

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Měření teploty okolí pomocí braggovských vláknově optických mřížek
Temperature measurement of environment with the help of Bragg grating

2009

Bc. Kateřina Horgošová

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně. Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

V Ostravě 6. května 2009

.....

Ráda bych na tomto místě poděkovala všem, kteří mi s prací pomohli, zejména prof. RNDr. Vladimíru Vašínkovi, Csc., který mi velmi pomohl svými užitečnými radami.

Abstrakt

Tato diplomová práce pojednává o vláknově optických Braggovských mřížkách. V první části jsou popsány jednomódová optická vlákna, která se používají při výrobě Braggovských mřížek. Následuje část, kde je stručný přehled laserů, které jsou využity při měření praktické části této práce. V další části je uveden stručný princip činnosti vláknových Braggovských mřížek a jejich základní typy. V následující části je uveden stručný princip činnosti přístroje WA-7100/7600, který byl také použit při měření. V poslední a praktické části práce je popsáno samotné měření Braggovských mřížek a vyhodnocení dosažených výsledků.

Klíčová slova: optická vlákna, disperze, lasery, Fabry-Perot laser, DFB laser, Braggovské mřížky

Abstrakt

The diploma thesis is focused on the fiber optical Bragg gratings. Single mode optical fibers, which are used in manufacturing Bragg gratings, are described in first part. In following part, there is short summary of lasers, which are employed with measuring practical part of this labor. In next chapter there is described short principle of operation fiber Bragg gratings and several distinct types of fiber Bragg grating structures. In following part there is principle of operation of instrument WA-7100/7600, which was also used for measuring. In last and practical part of this labor is described measuring of spectral characteristics Bragg gratings and interpretation attained results.

Keywords: optical fibers, dispersion, lasers, Fabry-Perot laser, DFB laser, Bragg grating

Seznam použitých zkratk a symbolů

$a[\mu\text{m}]$	- průměr vlákna v mikrometrech
DC	- depress cladding
DH	- dvojitý heteropřechod
DFB	- <i>Distributed Feed Back</i> – laser s distribuovanou zpětnou vazbou
E_g	- šířka zakázaného pásu
FFT	- <i>Fast Fourier Transformation</i> – rychlá Fourierova transformace
K	- mřížkový vektor
k_i	- vlnový vektor dopadající vlny
k_r	- vlnový vektor rozptýlené vlny
LASER	- <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> - zdroj monochromatického koherentního záření
MFD	- <i>Mode Field Diameter</i> - průměr módového pole
MM	- <i>multimode</i> – multimódová vlákna
NA	- numerická apertura
OH ⁻	- ionty hydroxylu
P[dBm]	- výkon v decibelmiliwatech
PMD	- polarizační módová disperze
SI	- křemíková vlákna
SM	- <i>singlemode</i> – jednomódová vlákna
$T[^\circ\text{C}]$	- teplota ve stupních celsia
USA	- <i>United States of America</i> – Spojené státy americké
UV laser	- <i>ultraviolet</i> – ultrafialový laser
ν	- normalizovaná frekvence
WDM	- <i>Wavelength Division Multiplexing</i> – vlnový multiplex
π	- Ludolfovo číslo
$\lambda[\text{nm}]$	- vlnová délka
$\lambda_B[\text{nm}]$	- Braggova vlnová délka
$\lambda_c[\text{nm}]$	- mezní vlnová délka
Λ	- perioda mřížkových ploch

1	ÚVOD.....	6
2	OPTICKÁ VLÁKNA	8
2.1	Jednomódová vlákna.....	9
2.2	Princip vedení energie vláknem.....	10
2.3	Profil indexu lomu	11
2.4	Ztráty v jednomódových vláknech	13
2.5	Disperze	14
3	LASERY	17
3.1	Princip laseru	17
3.2	Heterostrukturální lasery	19
3.3	Fabry – Perot lasery	20
3.4	Jednomódový laser DFB.....	22
4	BRAGGOVSKÉ MŘÍŽKY	23
4.1	Princip Braggovské mřížky	23
4.2	Běžný Braggův reflektor.....	24
4.3	Blazeované Braggovské mřížky	25
4.4	Chirpovaná Braggovská mřížka.....	26
5	PRINCIP MĚŘÍCÍHO PŘÍSTROJE.....	28
6	MŘÍŽKY BUZENÉ ŠIROKOSPEKTRÁLNÍM LASEREM	30
6.1	Uspořádání a složení měřícího pracoviště	30
6.2	Měření mřížky s Braggovskou vlnovou délkou 1310,336 nm.....	31
6.3	Měření mřížky s Braggovskou vlnovou délkou 1551,163 nm.....	33
7	MŘÍŽKY BUZENÉ DFB LASEREM	36
7.1	Uspořádání a složení měřícího pracoviště	36
7.2	Mřížka s vlnovou délkou 1533,234 nm	37
7.3	Mřížka s vlnovou délkou 1544,872 nm	40
7.4	Mřížka s vlnovou délkou 1553,522 nm	41
7.5	Mřížka s vlnovou délkou 1559,472 nm	42
7.6	Kombinace všech čtyřech mřížek	44
7.7	Kombinace dvou prvních mřížek.....	45
7.8	Kombinace dvou posledních mřížek.....	46
8	ZÁVĚR	48

1 Úvod

Ve své diplomové práci se věnuji problematice optických vláknových Braggovských mřížek. Jelikož se jedná o stále více se rozvíjející vědní obor, dochází v této oblasti k nárůstu nových poznatků. Objevuje se stále více možností aplikací, což je právě důvodem, proč se vývoj v oblasti optoelektroniky ubírá i tímto směrem. Objevují se stále nové způsoby jak Braggovské mřížky precizně v optických vláknech vyrobit, což má za následek spouštění nových koncepčních trendů a také řadu aplikací, které doposud nemají podobnost na poli optických senzorových aplikací. V této práci se chci zabývat chováním Braggovských mřížek při působení různých okolních teplot. Budou zde rozebrána optická jednomódová vlákna, dále zde bude rozebrán princip funkce laserů a popis několika typů laserů. K vlastnímu měření charakteristik by mělo být využito právě jednomódového optického vlákna a několika laserů pracujících na odlišných vlnových délkách. V této práci se také budu zabývat principem funkce optických vláknových Braggovských mřížek, jejich citlivostí na různé okolní vlivy a také zde bude popsáno několik základních typů vláknových Braggovských mřížek.

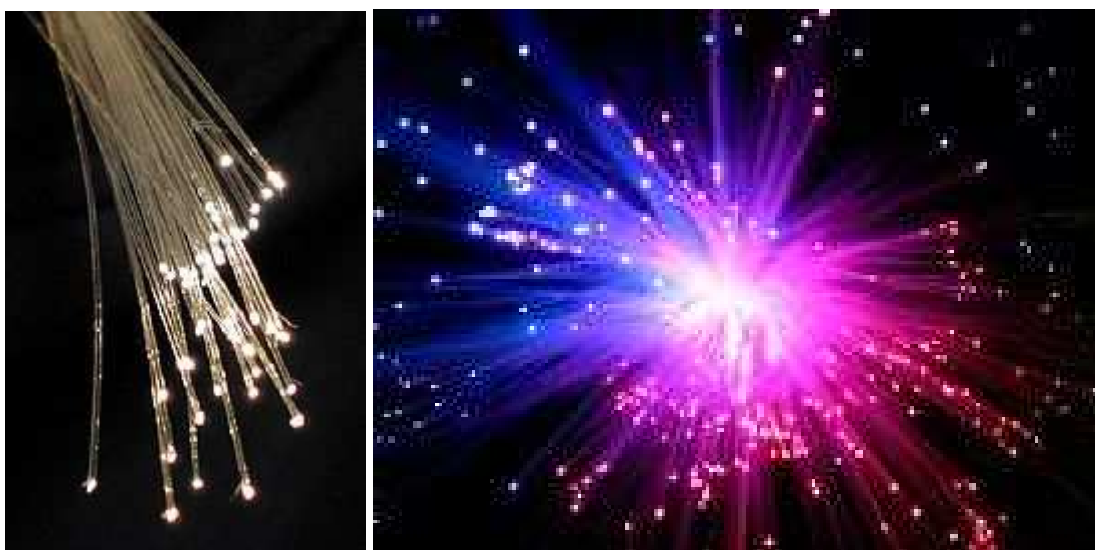
V praktické části budu využívat jednomódových vláken několika typů. Jedná se o dvě jednomódová vlákna, každé s jednou vypálenou Braggovskou mřížkou na určité vlnové délce. Každé bude proměřeno zvlášť za určitých opakovaných teplotních podmínek. Navíc bude využito většího rozsahu teplot (cca pokojové teploty 25°C až 60°C). K tomu bych chtěla využít vícemódových laserů, tzv. laserů s Fabry-Perot rezonátorem. Na tomto měření bych ráda poukázala na problematiku použití vícemódových zdrojů při využívání k osvětlování jednomódových vláken s Braggovskou mřížkou. Předpokládám, že využití těchto zdrojů v praxi nebude možné vzhledem k širokému spektru těchto zdrojů, což bych ráda ukázala na spektrálním měřiči vlnových délek, který bude využit pro tato měření. Tímto měřením se budu zabývat v kapitole 6.

Ve druhé části praktické práce bych se ráda zaměřila na více Braggovských mřížek v jednom vlákně a způsobu jejich vzájemného ovlivňování. K této části práce budu využívat speciálního jednomódového vlákna, které bylo vyrobeno právě pro měření k této diplomové práci. V tomto vlákně byly vyrobeny za sebou čtyři Braggovské mřížky a to každá na jiné vlnové délce. Mřížky budou proměřeny každá zvlášť a následně i v různých kombinacích a to podle možnosti zapojení měřícího pracoviště. V této části bych chtěla pozorovat jak se mění charakteristiky (útlum a vlnová délka) v závislosti na teplotě. Tu budu měnit ve stejném teplotním rozsahu jako u první části. Zatím nevím jak se mřížky přesně budou chovat, takže

nevím jaký způsob měření bude přesně zvolen. Zda budu proměřovat charakteristiky pouze jednou, nebo bude muset dojít k opakovanému měření a ohřívání at' už samostatných Braggovských mřížek nebo jejich kombinací. K tomuto měření by mělo být využito úzkospektrálních laserů, tzv. DBF laserů, oproti předchozímu měření. Pro měření je nutné, aby tyto úzkospektrální lasery měli stejnou rezonanční vlnovou délku jako bude vlnová délka Braggovských mřížek v optickém vlákně. Pouze za těchto podmínek by totiž mělo být možné pozorovat změny ve spektrálních charakteristikách Braggovských mřížek. Bude tedy zapotřebí osvětlovat vlákno čtyřmi DFB lasery. Na výstupu spektrálního měřiče vlnových délek poté budeme pozorovat spektrum vlnových délek, které Braggovskou mřížkou prošli a útlum optického signálu, který mřížkou projde. Předpokládám, že útlum optického signálu, který mřížkou projde bude lineárně narůstat spolu se vzrůstající teplotou. Stejně tak předpokládám, že rezonanční vlnová délka mřížek by se měla měnit tak, jak se bude postupně přibližovat rezonanční vlnové délce na které září DFB laser. Jak se budou Braggovské mřížky vzájemně ovlivňovat, pokud se vůbec nějak ovlivňovat budou nevím, ale dosažené výsledky měření budou uvedeny v kapitole 7.

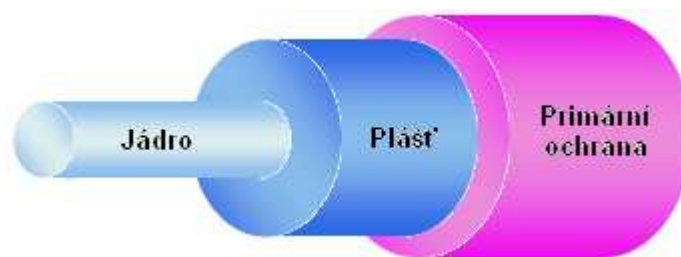
2 Optická vlákna

Optické vlákno (obr.1) je skleněné nebo plastové vlákno, které přenáší signály prostřednictvím světla ve směru své podélné osy. Optické vlákno je výsledkem aplikace vědeckých poznatků v inženýrství. Optická vlákna jsou široce využívána v komunikacích, kde umožňují přenos na delší vzdálenosti a použití vyšších přenosových rychlostí dat než jiné formy komunikace. Vlákna se používají místo kovových vodičů, protože signály jsou přenášeny s menší ztrátou, a zároveň jsou vlákna imunní vůči elektromagnetickému rušení. Vlákna se používají také pro osvětlení a jsou pak balena ve svazcích, takže mohou být použita k přenosu obrazů, což umožňuje zobrazení v těsných prostorech. Speciálně konstruovaná vlákna se používají pro řadu dalších aplikací, včetně snímače a vláknového laseru [1].



Obrázek 1: Svazek optického vlákna [převzato z 1]

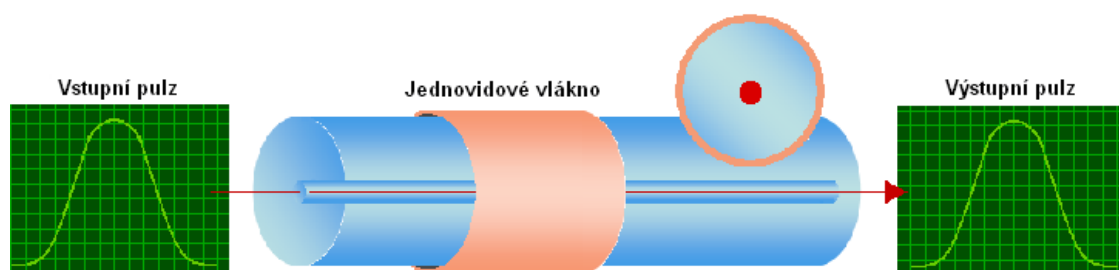
Optické vlákno je dielektrický vlnovod, ve kterém se šíří elektromagnetické vlny (zpravidla světlo či infračervené záření) ve směru osy vlákna s využitím principu totálního odrazu na rozhraní dvou prostředí s rozdílným indexem lomu. Vnitřní část vlákna se nazývá jádro, okolo jádra je plášť a primární ochrana (obr.2). U optických vláken používaných v datových sítích se udává průměr jádra a pláště v mikrometrech, používají se mnohamódová vlákna (MM) o průměrech 50/125 μm nebo 62,5/125 μm (používá se především v USA). V telekomunikacích se dnes výhradně používají jednomódová vlákna (SM) o průměru 9/125 μm . V následujícím textu se budeme zabývat výhradně jednomódovými vlákny [1].



Obrázek 2: Struktura optického vlákna

2.1 Jednomódová vlákna

Jednomódová vlákna (zkratka SM, z anglického single mode) vykazují nejlepší parametry optické přenosové cesty. Mají nejmenší průměr jádra (do 10 μm), a proto se do něj vejde pouze jeden mód (obr.3). Takto malé jádro má za následek velký úhel odrazu ve vlákně, to vede k menšímu prodloužení dráhy paprsku. Tyto vlákna dosahují podstatně vyšších přenosových rychlostí na delších trasách než tomu může být u mnohamódových vláken. Nejběžnější typ jednomódových vláken má průměr jádra 8-10 μm a je navrhován hlavně pro užití v průmyslu, kde se používá infračervené světlo. Jsou používána všude tam, kde je požadovaná velká šířka pásma a malý útlum. Vidová struktura závisí na vlnové délce použitého světla [1].



Obrázek 3: Šíření pulzu jednomódovým vláknem

Světelná energie ve vlákně není úplně upevněná v jádře. Místo toho, hlavně u jednomódového vlákna, je výrazný podíl energie vyzařován do obalu okolo jádra (je to například i u tlumených vln).

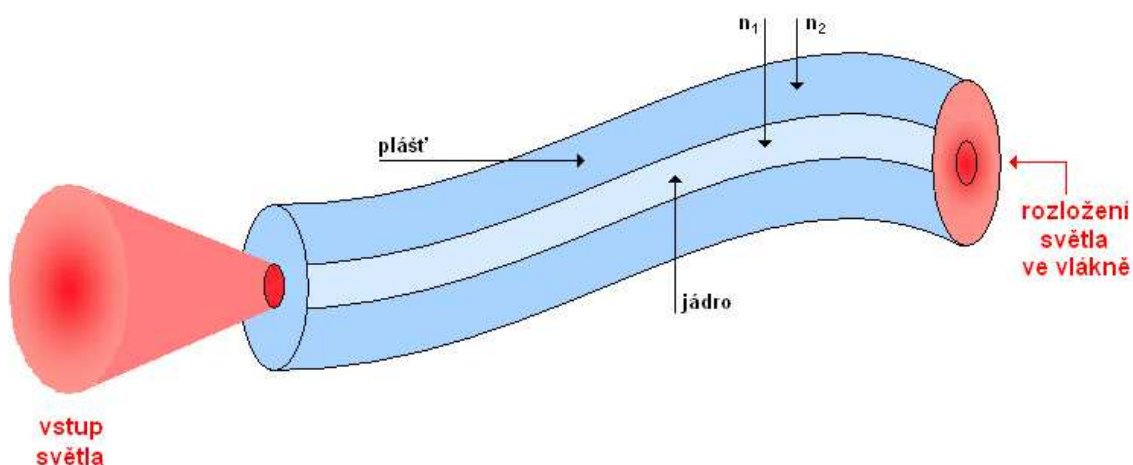
Podmínka jednomódových vláken je určena prvním kořenem Besselovské funkce. Pro jednomódový režim vlákna musí platit tento vztah [1]:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot NA \leq 2,405 \quad (1)$$

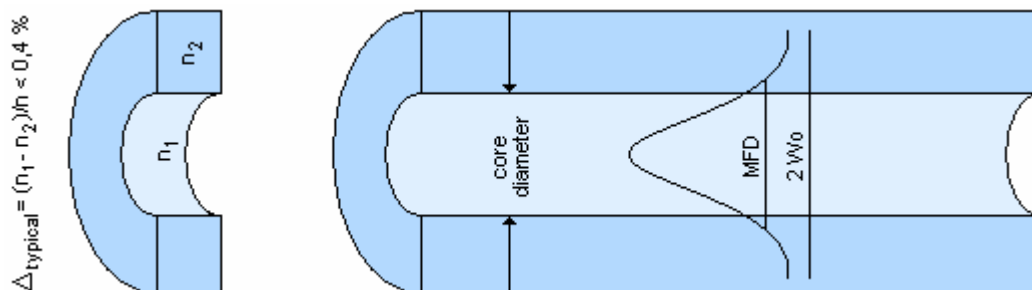
Ze vztahu plyne, že jednomódový režim se dá ovládat pomocí třech veličin. Je to vlnová délka λ a numerická apertura NA , avšak u těchto veličin jsme omezeni fyzikálními zákony. Dále je to pak průměr vlákna a , kde omezení prakticky nejsme, protože je to pouze věc technologie výroby vlákna.

2.2 Princip vedení energie vláknem

U těchto vláken stejně jako u mnohamódových se světlo šíří díky úplnému odrazu o rozhraní jádra a pláště, ale kvůli velikosti jádra se celkem velké množství energie šíří pláštěm (obr.4) v podobě evanescentní vlny (tato vlna velmi rychle zaniká se vzdalováním od rozhraní, avšak podél rozhraní se šíří beze ztrát a její energie není doplňována dopadající vlnou. Dá se říci, že tato vlna vlastně vlnou vůbec není, fáze se ve směru šíření nemění, protože fázová konstanta je nulová, a amplituda exponenciálně klesá, protože konstanta útlumu je nenulová). Toto je důvodem, proč mají jednomódová vlákna velký průměr pláště.



Obrázek 4: Distribuce světla v SM vlákně



Obrázek 5: Průměr módového pole

U těchto typů vláken se jen velmi těžko určuje rozhraní mezi jádrem a pláštěm a proto se zavedl parametr MFD (mode field diameter) průměr módového pole (obr.5). Je to konstanta, která udává šířku, ve které je intenzita přenášeného optického záření větší nebo rovna 0,135 z maximální intenzity [3]. Vidový průměr je závislý na vlnové délce. Čím kratší je vlnová délka, tím menší je hodnota MFD. Tento parametr je velmi důležitý při spojování (svažování) vláken. Zde není důležitý průměr vlákna, ale právě tento parametr.

Je důležité, aby svažovaná vlákna měly shodný průměr módového pole kvůli nárůstu nežádoucího útlumu. Je zde také zaveden parametr mezní vlnové délky λ_c , který určuje ostatní parametry vlákna pro SM režim [2].

$$\lambda_c \leq \frac{\pi \cdot a \cdot NA}{2,405} \quad (2)$$

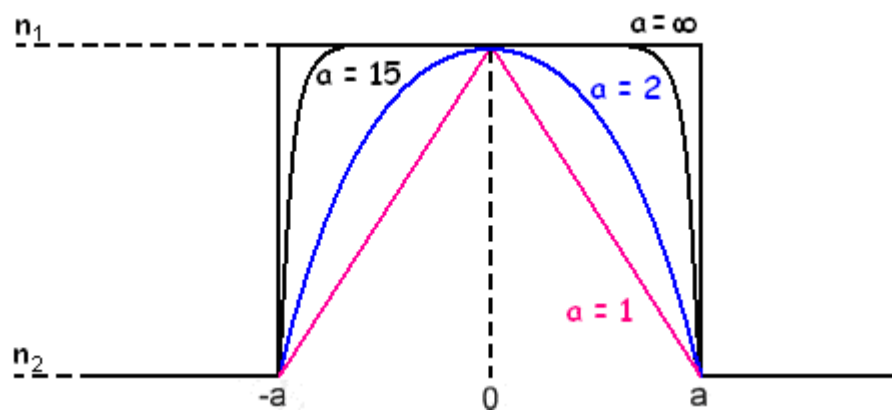
Tato vlnová délka umožňuje vláknu být pro jednu vlnovou délku jednomódové a pro jinou vlnovou délku mnohamódové.

2.3 Profil indexu lomu

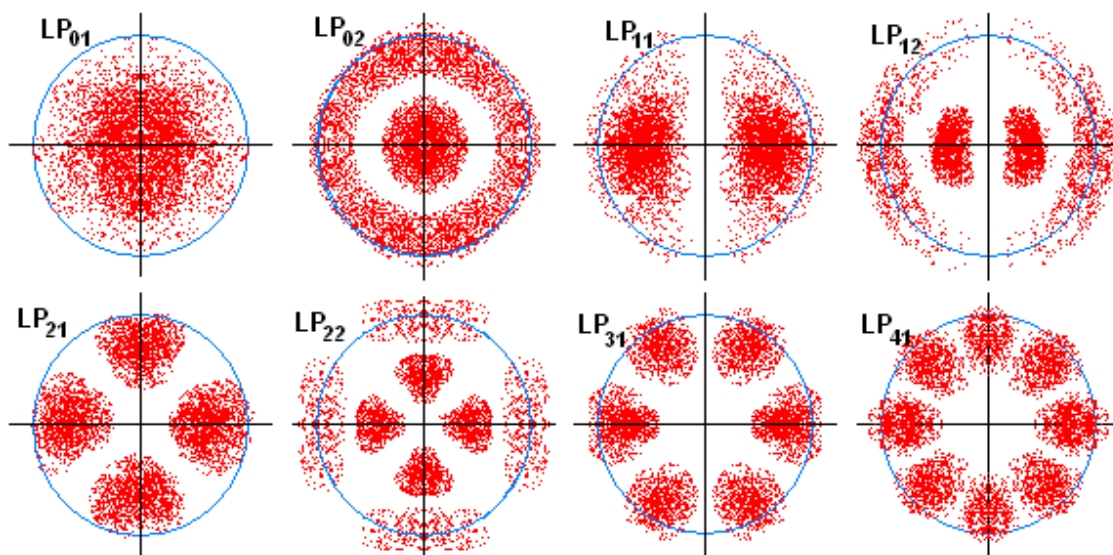
V praxi se používají mnohem komplikovanější profily indexu lomu než jsou třeba u SI vláken a ty vláknům propůjčují zajímavé vlastnosti.

Vlákna se popisují pomocí LP módů (obr.7). Profil se skokovou změnou indexu lomu nebo gradientní profil (není jasně definováno rozhraní jádra a pláště) je nejčastějším profilem.

Profil indexu lomu ovlivňuje ztráty v SM vláknech. U těchto vláken zasahuje velká část světla do pláště, a proto jsou tyto vlákna citlivější na ohyby. Kvůli této vlastnosti se vymýšlejí vlákna, která by vedla světlo co nejvíce u středu vlákna. Toho se dosahuje různými průběhy indexu lomu jádra (obr.6).



Obrázek 6: Průběhy indexu lomu

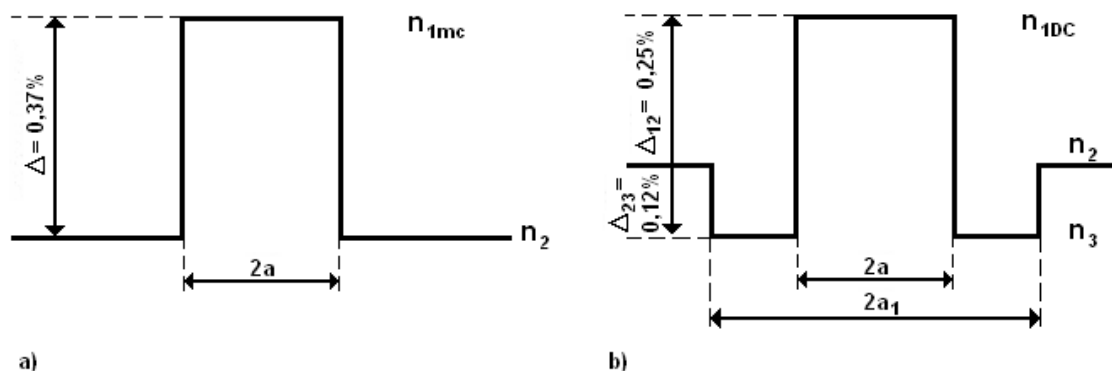


Obrázek 7: Vidové vzory jednotlivých vidů vlákna

Depressed cladding (DC) vlákna jsou možností jak potlačit ohybové ztráty. Průběh indexu lomu pro klasické SI vlákna je na obrázku 8 (a), zatímco průběh indexu lomu pro DC vlákno je na obrázku 8 (b).

Index lomu jádra n_{DC} bývá menší než index lomu obyčejného SI vlákna. Je to způsobeno menší dotací jádra. Hodnota Δ zůstává nezměněná jen je zde vytvořen pokles indexu lomu v blízkosti jádra. Tento snížený index lomu označovaný jako n_3 bývá vytvořen příměsí fluoru (F) nebo příměsí oxidu boritého (B_2O_3). Tento proces vytváří podmínky pro lepší vedení módu [2].

Zde nastává ovšem možnost, že se zvětší útlum kvůli zasahování světla do pláště. Tato situace se dá vyřešit tím, že zvětšíme hodnotu a_1 tolik, aby se evanescentní pole blížilo co nejvíce nule.



Obrázek 8: Profil indexu lomu SI vlákna a); a profil indexu lomu DC vlákna b)

Další velmi cennou vlastností tohoto typu vlákna je, že dokáže kompenzovat chromatickou disperzi.

2.4 Ztráty v jednomódových vláknech

Jednomódová vlákna jsou schopna přenášet velký objem informací, uchovávají také vysokou přesnost světelných impulsů na velké vzdálenosti a pracují na vyšší přenosové rychlosti. Do SM vláken bývá také navazován vyšší výkon, což se může projevit nelineárními jevy.

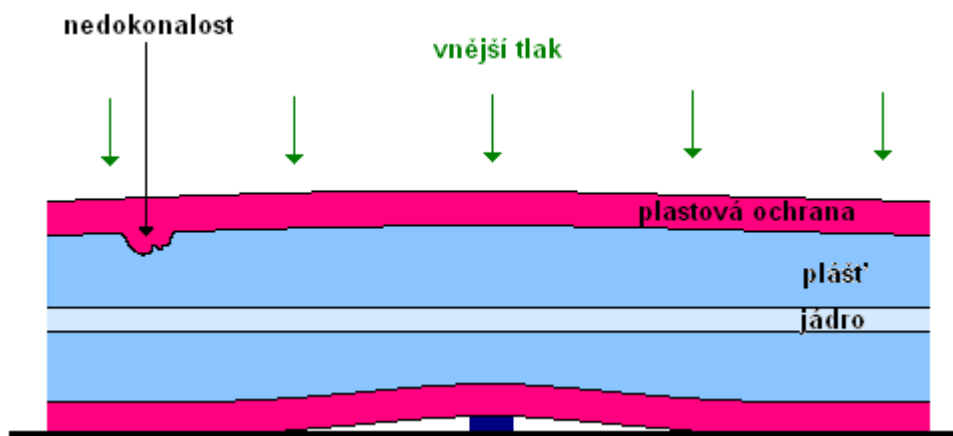
Ztráty v materiálu se projevují ve vlastní a nevlastní absorpci v materiálu jádra. Všechny ztráty jsou závislé na vlnové délce optického záření. Vlastní absorpce spočívá v pohlcení části optického záření vlastními molekulami materiálu optického vlákna. Materiálová nepřímá absorpce je způsobena pohlcením části optického záření molekulami nečistot, které se do vlákna dostaly při jeho výrobě. Při žíhání vyráběného vlákna dochází ke složitým chemickým reakcím, na kterých se významně podílí voda. Ve vláknu po žíhání zůstávají ionty hydroxylu OH^- , které způsobují na některých vlnových délkách absorpci optického záření [3].

Při ohýbání optického vlákna, dochází ke změně úhlů dopadu a odrazu přenášených paprsků. Některé paprsky mohou překročit mezní hodnotu úhlu odrazu a proniknou do pláště místo toho, aby se vrátili zpět do jádra. Na výstupu je pak menší energie než na vstupu. U SM

vláken se spousta energie šíří pláštěm (může to být až 40%) a tu lze právě díky ohybu vyvézt z vlákna ven.

S velikostí MFD narůstají ohybové ztráty. A jak už bylo v předchozím textu řečeno, MFD narůstá s vlnovou délkou. Z tohoto je jasné, že vlákna s vlnovou délkou 1550 nm jsou mnohem víc choulostivá na ohybové ztráty než jsou vlákna s vlnovou délkou 1310 nm.

Mikroohyby jsou způsobené existencí drobných nedokonalostí a chyb v geometrii vlákna. Tyto mikroohyby mohou také vzniknout působením vnějších sil, které deformují plášť kabelu (obr.9). Mají závislost na vlnové délce, čím větší je vlnová délka, tím jsou mikroohybové ztráty větší.



Obrázek 9: Ztráty způsobené mikroohyby

Další možné ztráty které mohou nastat, může způsobit různá velikost módového pole, pokud bychom se rozhodli vlákna svařovat. Musíme počítat s tím, že nám okamžitě naroste útlum tohoto vlákna.

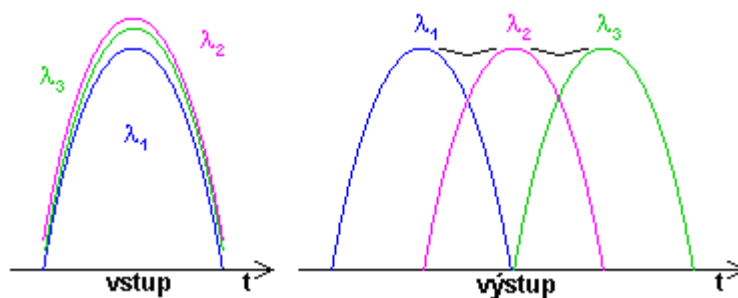
2.5 Disperze

Disperze je příčinou zkreslení přijímaného signálu. Tyto jevy nejvíce limitují přenosové vlastnosti optických vláken. Jde o rozšiřování optických pulsů při průchodu optickým vláknem (obr.10). SM vlákna nevykazují módovou disperzi, u těchto vláken se nejvíc projevuje materiálová disperze.



Obrázek 10: Vliv disperze na SM vlákno

Chromatická disperze se skládá z materiálové a vlnovodové disperze. Materiálová disperze je dána tím, že zdroje nejsou ideálně monochromatické, ale jejich záření se skládá z celého spektra vlnových délek. Každá vlnová délka tohoto záření má ve vláknu odlišnou rychlost šíření. Jednotlivé spektrální složky dorazí na konec vlákna v jiném okamžiku (obr.11), skládají se vzájemně časově posunuté, jejich časový průběh je odlišný než na začátku vlákna. Se zkracující se vlnovou délkou se zmenšuje rychlost šíření této vlnové délky. U standardních SM vláken je materiálová disperze v oblasti 1310 nm nulová a na 1550 nm je taková, že může omezovat jejich použití (přenosovou rychlost nebo vzdálenost).



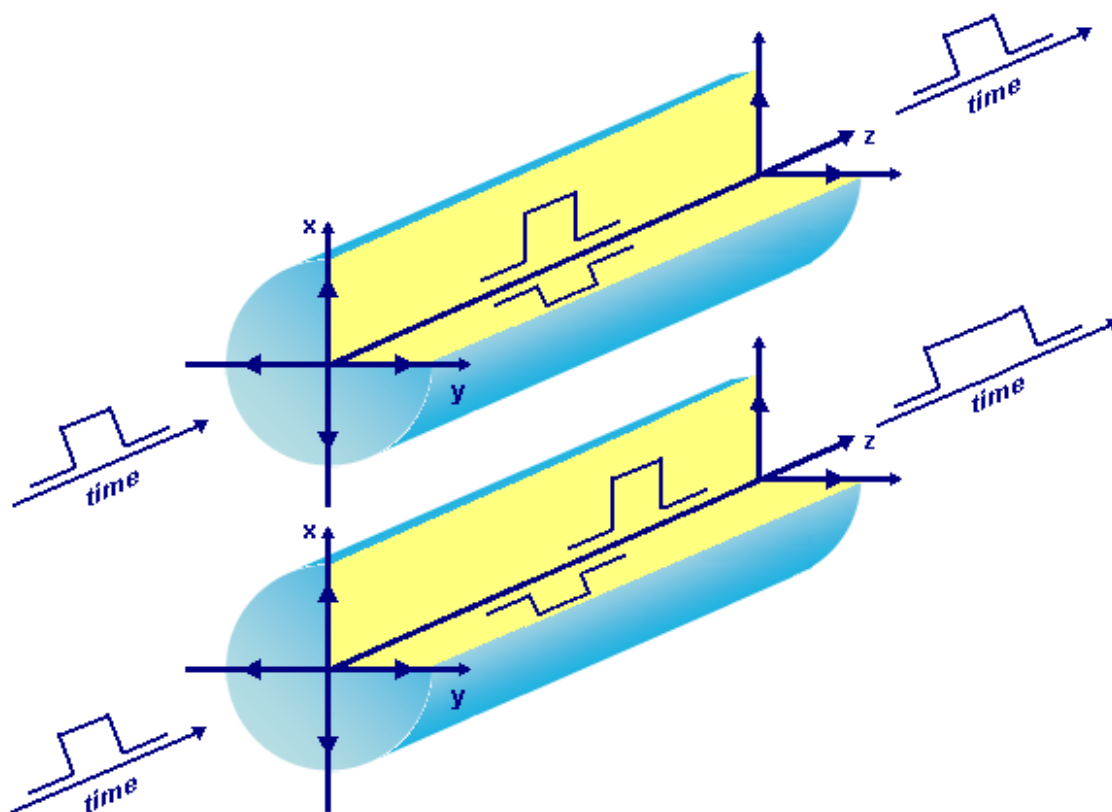
Obrázek 11: Rozšíření pulzu materiálovou disperzí

Druhou součástí chromatické disperze je vlnovodová disperze, kterou způsobuje světlo, které je vedené jádrem SM vlákna a proniká do pláště. Je to důsledek toho, že jádro má jiný index lomu než je index lomu pláště. Světlo šířící se jádrem má tedy jinou rychlost než světlo šířící se pláštěm optického vlákna a na konci vlákna tak vychází rozšířený pulz (obr.12). Parametr vlnovodové disperze je u SM vláken vždy záporný, nastává zde tedy možnost chromatickou disperzi kompenzovat. Již bylo zmíněno, parametr materiálové disperze je pro vlnové délky větší než 1310 nm nenulový a je potřeba dodat, že je vždy kladný.



Obrázek 12: Rozšíření pulzu vlnovodovou disperzí

U SM vláken se projevuje polarizační módová disperze (PMD). Ve vlákne lze nalézt dvě vzájemně kolmé polarizační roviny. Jakákoli kruhová nesymetrie vlákna (vznik ve výrobě, mikroohyby způsobené montáží nebo vnějším tlakem apod.) způsobí šíření obou polarizací jinou rychlostí a tedy rozšíření impulzu (obr.13) nebo zkreslení analogového signálu [3]. Pokud se chromatická disperze eliminuje, pak polarizační módová disperze je hlavním problémem pro zvyšování přenosových rychlostí.



Obrázek 13: Rozšíření pulzů PMD

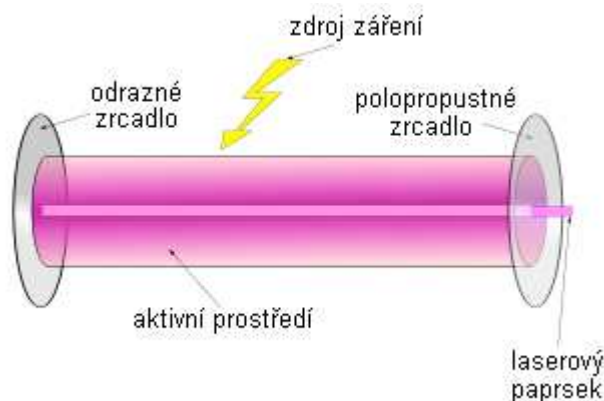
3 Lasery

Laser je anglická zkratka pro Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což se dá přeložit jako zesilování světla stimulovanou emisí záření. Laser je zdroj elektromagnetického záření. Světlo je z laseru vyzařováno v úzkém svazku paprsků a je odlišné od přirozených zdrojů také tím, že je koherentní (uspořádané) a monochromatické (jednobarevné) [1].

3.1 Princip laseru

Laser je tvořen aktivním prostředím, rezonátorem (odrazné a polopropustné zrcadlo) a zdrojem energie (obr.14)[1].

Zdrojem energie, který může představovat například výbojka, je do aktivního média dodávána energie. Ta energeticky vybudí elektrony aktivního prostředí ze základní energetické hladiny do vyšší energetické hladiny, dojde k tzv. excitaci. Takto je do vyšších energetických stavů vybudena většina elektronů aktivního prostředí a vzniká tak tzv. inverze populace[1].

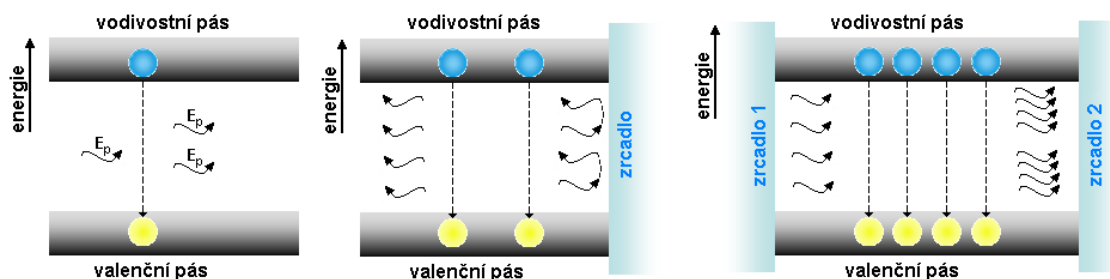


Obrázek 14: Konstrukce laseru [upraven podle 1]

Při opětovném přestupu elektronu na nižší energetickou hladinu dojde k vyzaření (emisi) kvanta energie ve formě fotonů. Tyto fotony následně interagují s dalšími elektrony inverzí populace, čímž spouštějí tzv. stimulovanou emisi fotonů, se stejnou frekvencí a fází [1].

Díky umístění aktivní části laseru do rezonátoru, tvořeného například zrcadly, dochází k odrazu paprsku fotonů a jeho opětovnému průchodu prostředím. To dále podporuje

stimulovanou emisí, a tím dochází k exponenciálnímu zesilování toku fotonů (obr.15). Výsledný světelný paprsek pak opouští tělo laseru průchodem skrze polopropustné zrcadlo [1].



Obrázek 15: Exponenciální zesilování toku

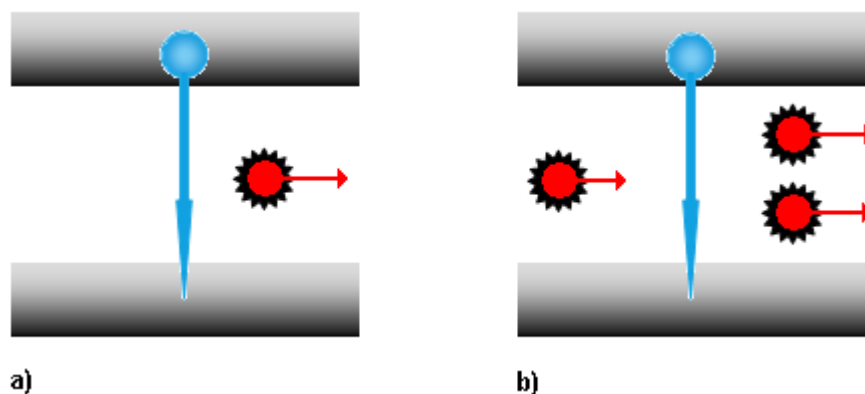
Ve většině laserů světlo opakovaně prochází tzv. rezonátorem – optickou dutinou vymezenou zrcadly. V nejobvyklejších případech je rezonátor tvořen dvěma zrcadly, z nichž je jedno zcela odrazivé a druhé částečně propustné. Polopropustným zrcadlem uniká chtěná energie z laseru [1].

Aktivní prostředí je látka obsahující oddělené kvantové energetické hladiny elektronů; může se jednat o:

- plyn nebo směs plynů, hovoříme pak o plynových laserech,
- monokrystal, kde hladiny vznikají dopováním; takové lasery se nazývají pevnolátkové,
- polovodič s P-N přechodem v případě diodových (polovodičových) laserů,
- organické barvivo rozpuštěné ve vhodném roztoku; jedná se o kapalné – barvivové lasery [1].

Elektrony mohou přecházet z vyššího do nižšího stavu, při současném vyzáření fotonu, jedním z dvou mechanismů:

- spontánní emise (foton se vyzáří samovolně),
- stimulovaná emise (okopíruje se jiný foton procházející atomem) [1].



Obrázek 16: Spontánní emise a); stimulovaná emise b)

Ke spontánní emisi (obr.16 (a)) dochází při nízkém stupni obsazení vyšší hladiny; pro spuštění stimulované emise (obr.16 (b)) ve větším měřítku (generace laserového záření) je třeba čerpáním dosáhnout tzv. populační inverze, kdy vyšší hladina je obsazena více elektrony než nižší [1].

Při přenosu informací se používají lasery pracující v nepřetržitém režimu. Atmosféra ale laserový paprsek silně oslabuje, proto je vhodné použít lasery pracující v oblasti takzvaných atmosférických oken, pro která je atmosféra velmi průzračná. Většina laserů pracuje na jedné určité frekvenci, kterou není možné měnit. Pokud chceme používat více frekvencí, použijeme lasery přeladitelné.

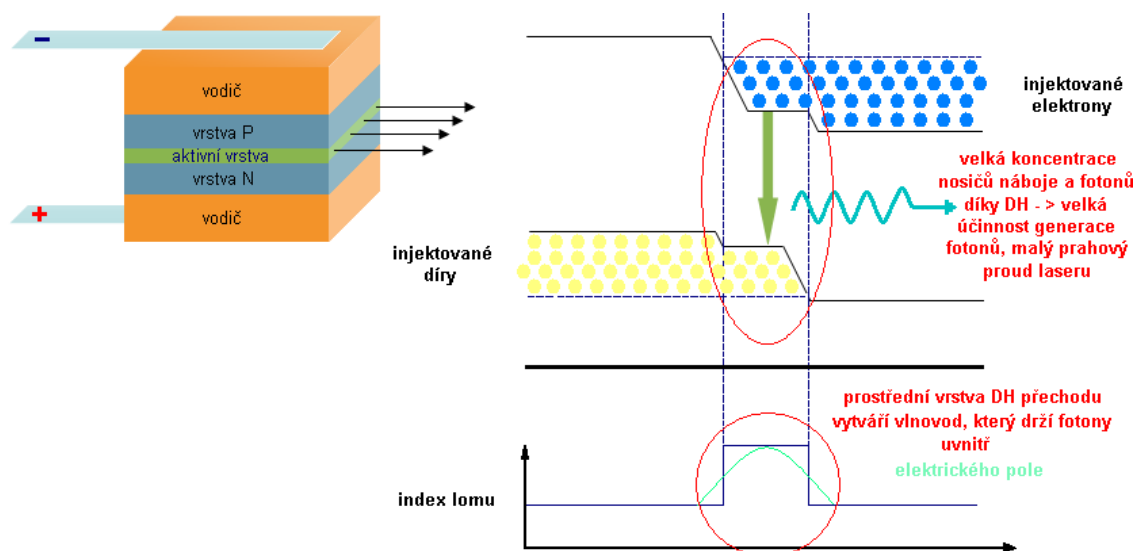
Z důvodu rozměrů, hmotnosti a možnosti integrace s dalšími součástmi se dnes v telekomunikační technice používají v praxi polovodičové lasery. Tyto lasery se dají dělit podle různých kritérií, např. podle módové struktury se kterou úzce souvisí spektrální charakteristika laseru.

3.2 Heterostrukturální lasery

Kromě heterostrukturálních laserů existují i homostrukturální lasery – na tomto typu laseru bylo poprvé dosaženo emise koherentního záření. Homogenní PN přechody polovodiče mají stejnou šířku zakázaného pásu E_g . Nevýhodou homostrukturálních laserů je malá účinnost a obtížná vazba na optické vlákno.

Proto se pro lasery používané v komunikačních systémech používají heterostrukturální přechody. Nejčastěji používaná je heterostruktura, má aktivní vrstvu obklopenou z obou stran

vrstvami s větší šířkou zakázaného pásu. Oblast rekombinace je u dvojitého heterostrukturního přechodu (obr.17) přesně vymezená. Nedochází zde k přechodu nosičů náboje do okolních vrstev struktury. Účinnost této struktury je velmi vysoká [4].



Obrázek 17: Dvojitý heteropřechod – DH

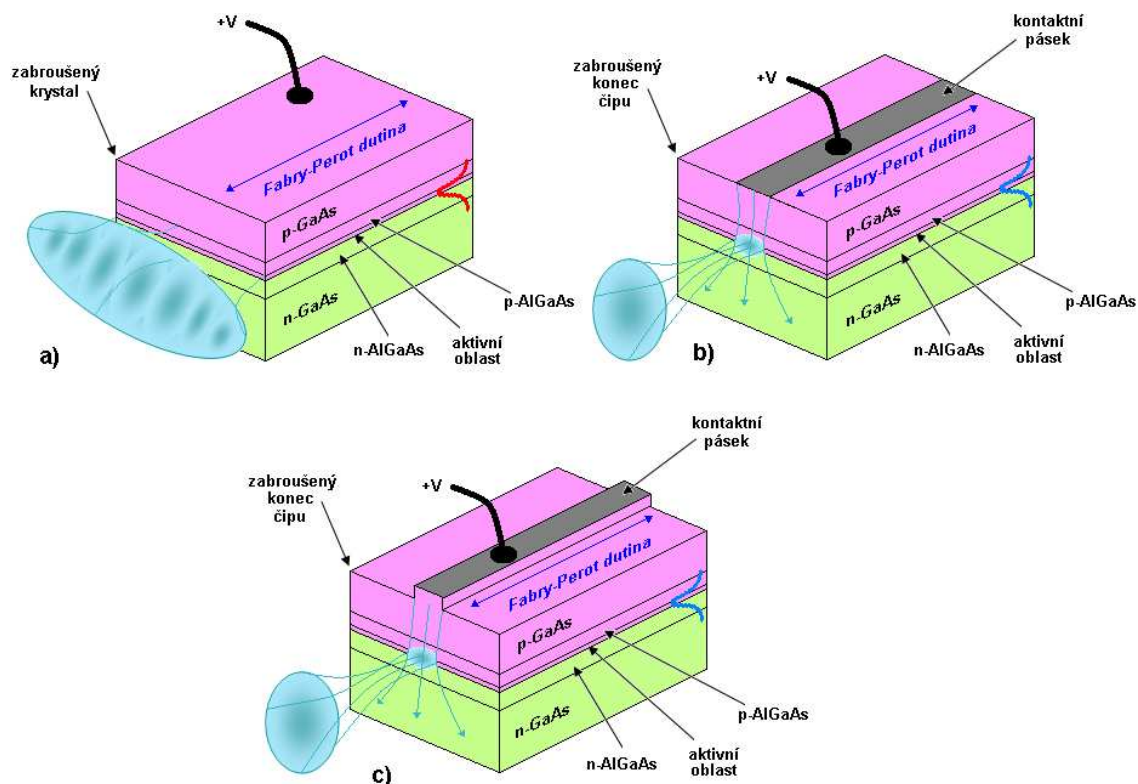
3.3 Fabry – Perot lasery

Fabry-Perot (FP) laser je mnohamódový laser. Rezonátor u Fabry-Perot laserů omezuje vlny na stojaté. U ostatních vln je skoková změna fáze a proto se nešíří. Podmínka pro kterou se mohou šířit v rezonátoru pouze stojaté vlny je vyjádřena [2]

$$n \cdot L = N \frac{\lambda}{2} \quad (5)$$

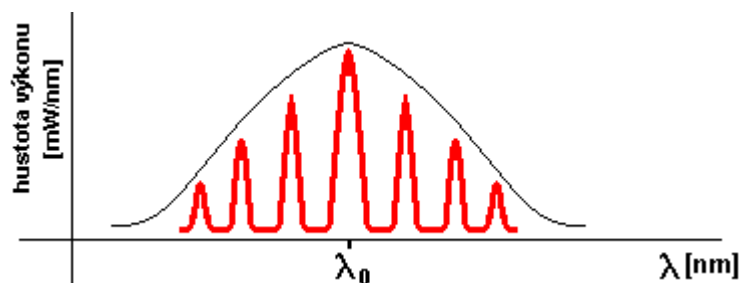
Rezonátor podporuje podélné módy laseru. Je několik typů laserů s Fabry-Perot dutinou, které jsou zobrazeny na obrázku 18. Obrázek 18 (a) zobrazuje laser bez laterálního omezení, který má vícebodový výstupní svazek s velkou divergencí svazku. Tento typ laseru s Fabry-Perot rezonátorem se dnes již používá velmi málo a to z důvodu nestabilního režimu. Obrázek 18 (b) ukazuje laser s laterálním omezením řízený ziskem. V laterálním směru se rezonátor omezí průchozím proudem, v této části se zvýší index lomu. Je to jednoduché řešení, ale je nestabilní, při modulaci dochází k přeskokování vidů. Na obrázku 18 (c) je opět laser s laterálním omezením, ale tentokrát je řízený indexem. Nyní je v laterálním směru rezonátor

omezený indexem lomu, tím se vytvoří vlnovod. Režim je stabilní, při modulaci nedochází k přeskokování vidů [4].



Obrázek 18: Lasery s Fabry-Perot rezonátorem; a) Laser bez laterálního omezení; b),c) s laterálním omezením

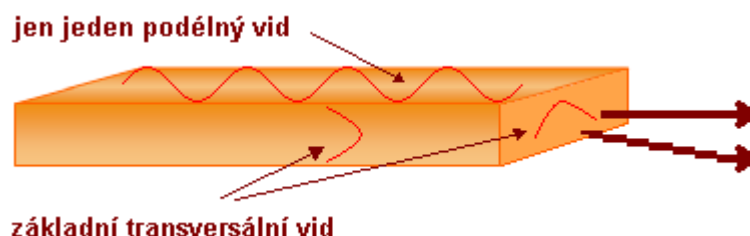
Fabry-Perot polovodičový laser produkuje výsledně hřebenový tvar spektra (obr.19). Každý peak ve spektru odpovídá dílčímu podélnému vidu Fabry-Perotova rezonátoru. Fabry-Perot lasery se používají pro aplikace na kratší vzdálenosti, kde nevádí větší šířka spektra.



Obrázek 19: Šířka spektra FP laseru

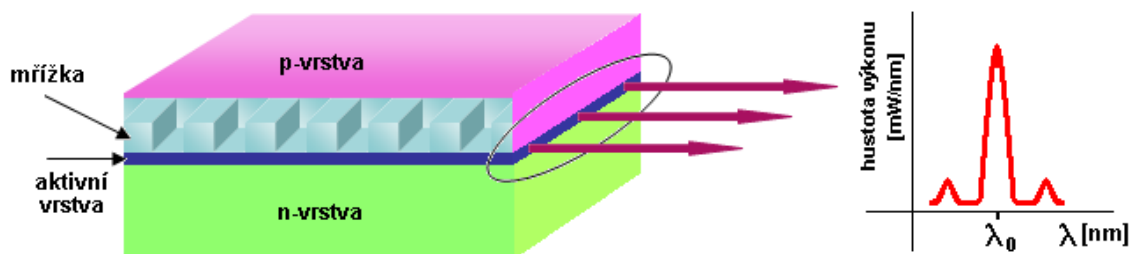
3.4 Jednomódový laser DFB

Pro systémy s vysokými přenosovými rychlostmi byly vyvinuty speciální polovodičové lasery. Vyzařují pouze na jedné vlnové délce, jsou jednomódové, ve spektru je jen jeden peak (obr.21 (b)), mají jeden základní podélný vid (obr.20)



Obrázek 20: Jednomódový laser

K potlačení ostatních podélných vidů, které se vyskytují u mnohamódových laserů se používá vlnově nebo frekvenčně selektivní zpětná vazba uvnitř rezonátoru. Zpětná vazba zabráňuje oscilaci základního podélného vidu a tím vzniku dalších podélných vidů. Vlnově selektivní zpětná vazba je použita u DFB (Distributed Feed Back) laserů. Je to laser s distribuovanou zpětnou vazbou, té se dosahuje pomocí Braggovské mřížky (obr.21 (a)).



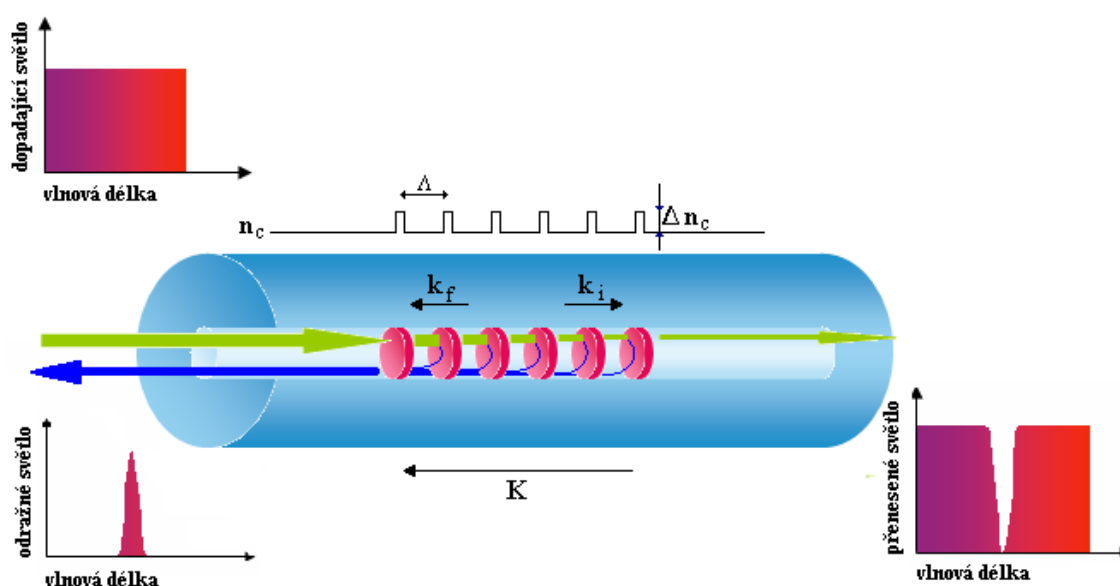
Obrázek 21: Princip Braggovské mřížky v polovodiči a); šířka spektra DFB laseru b)

4 Braggovské mřížky

Braggovská vláknová mřížka se v její nejjednodušší formě skládá z opakující se modulace indexu lomu jádra jednomódového optického vlákna. Tyto typy jednotných vláknových mřížek mají čela fáze kolmé k jejich podélné ose vlákna. Plochy mřížek mají konstantní periodu a jsou považovány za základní stavební kameny pro většinu Braggovských mřížkových struktur. Vláknová mřížka může být vyrobena např. rytím nebo v současnosti nejpoužívanější metodou, kterou je vypálení pomocí UV laseru v průběhu tažení samotného vlákna.

4.1 Princip Braggovské mřížky

Světlo je vedeno podél jádra optického vlákna a je následně rozptýleno každou mřížkovou plochou. Mřížka je v jádru vyrobena ze střídajících se oblastí s periodou Λ , která je složená z indexu lomu $n_c + \Delta n_c$ následovaným indexem n_c . Když je optický signál vpuštěný do jádra, určitá část vedeného světla je rozptýlena indexem Δn_c na každém rozhraní mřížkové plochy. Pro správnou funkci Braggovské mřížky je nutné, aby byla splněna Braggova podmínka. Pokud podmínka není splněna, světlo které se odrazí od každé z následujících ploch se stává fázově posunuté a nakonec se vyruší. Tam kde je splněna Braggova podmínka se příspěvky odraženého světla od každé mřížkové plochy přičítají ve zpětném směru a vytváří tak vrchol zpětného odrazu (obr.22).



Obrázek 22: Běžná Braggovská mřížka s konstantním indexem modulace a periody

Braggova podmínka je jednoduchý požadavek, který splňuje zákon zachování energie a zákon zachování hybnosti. Zachování energie vyžaduje, aby frekvence dopadajícího záření a odraženého záření byla stejná. Zachování hybnosti vyžaduje, aby se vlnový vektor dopadající vlny k_i plus mřížkový vektor K rovnal vlnovému vektoru z rozptýleného záření k_f :

$$k_i + K = k_f \quad (6)$$

Podmínka zachování hybnosti

$$2 \left(\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B} \right) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (7)$$

se dá zjednodušit na první řád Braggovy podmínky

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \quad (8)$$

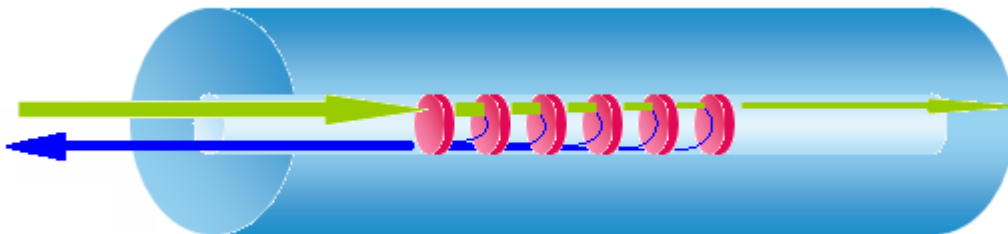
kde Braggovská vlnová délka λ_B je střední vlnová délka vstupního světla, které bude zpětně odraženo od Braggovské mřížky a n_{eff} je efektivní index lomu jádra vlákna.

Braggova rezonance, která je střední vlnovou délkou zpětně odraženého světla od Braggovské mřížky, závisí na efektivním indexu lomu jádra a pravidelnosti mřížky. Efektivní index lomu stejně jako pravidelné rozestupy mezi mřížkovými plochami bude ovlivněna změnami napětí a teploty.

Je několik odlišných typů struktur Braggovských mřížek: běžný Braggův reflektor, blazeovaná Braggova mřížka a chirpovaná mřížka. Tyto vláknové Braggovské mřížky jsou významné jejich rozestupy mezi mřížkovými plochami nebo sklonem ploch mřížek.

4.2 Běžný Braggův reflektor

Nejběžnější mřížkou je Braggův reflektor, který má konstantní rozestupy mezi plochami. Běžný Braggův reflektor, nejjednodušší a nejvíc používaná vláknová Braggovská mřížka je zobrazena na obrázku 23. Braggův reflektor může fungovat jako úzkopásmový přenosový nebo odrazový filtr nebo jako širokopásmové zrcadlo. V kombinaci s jinými Braggovými reflektory mohou být tyto zařízení uspořádána do funkce pásmové propusti.

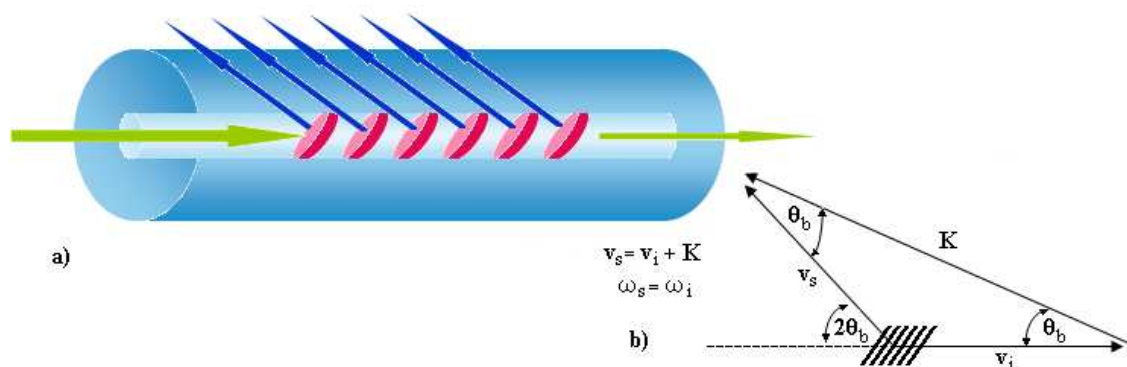


Obrázek 23: Běžný Braggův reflektor

Braggovy reflektory jsou považovány za excelentní zdroj citlivosti na napětí a teplotu, protože rozměry jsou zakódované ve vlnové délce. Toto eliminuje problémy s amplitudou nebo intenzitou výkyvů, které existují v mnoha jiných typech vláknově založených senzorových systémech. Každý Braggův reflektor může být určen jeho vlastním podpisem (zakódovaná vlnová délka), tedy série mřížek může být vepsána ve stejném vlákně, každá mající rozdílnou Braggovu rezonanci. Tato konfigurace může být použita pro WDM systémy. Mřížky se projevují také jako velmi užitečné součásti polovodičových laserů, sloužící jako jeden nebo oba konce laserového rezonátoru (závisí na konfiguraci laseru). Skupiny Braggových reflektorů mající rozdílné podpisy (zakódované ve vlnové délce) mohou být multiplexovány ve vláknovém laserovém senzoru, který je sestaven pro mnohabodové snímání.

4.3 Blazeované Braggovské mřížky

Blazeovaná mřížka má čelo fáze skloněno s ohledem k vláknovým osám, což je úhel mezi mřížkovými plochami a vláknovými osami menší než 90 stupňů. Klopení (blazeování) Braggovské mřížkové plochy šikmo k vláknovým osám (obr.24 (a)) má za následek světlo, které je vedené jádrem vlákna a je částečně propuštěno a částečně vyzářeno z jádra do pláště. Sklon mřížkových ploch a intenzita indexu modulace určuje účinnost vazby a šířku pásma světla, které je vypuštěné ven. Kritérium ke splnění Braggovy podmínky blazeovaných mřížek je podobné jako u Braggova reflektoru, který byl analyzován dříve. Obrázek 24 (b) zobrazuje vektorový diagram Braggovy podmínky (zachování energie a hybnosti) pro blazeované mřížky. Zde je vlnový vektor mřížky K příslušný k úhlu θ_b s ohledem k vláknovým osám. Velikost vedlejšího vlnového vektoru v_i a rozptýleného vlnového vektoru v_s se musí rovnat ($v = |v_i| = |v_s|$). Jednoduchá trigonometrie ukazuje, že rozptýlený vlnový vektor musí být v úhlu $2\theta_b$ s ohledem k vláknovým osám.



Obrázek 24: Základní schéma blazeované mřížky (a); Vektorový diagram Braggovy podmínky blazeované mřížky (b)

Erbiem dotované vláknové zesilovače jsou nyní nedílnou součástí dálkových vysokorychlostních komunikačních systémů a jsou hledané aplikace v oblastech širokopásmového zesílení. Kashyap a kol. předvedli použití vícenásobných blazeovaných mřížek k vyrovnání zisku Erbiem dotovaných vláknových zesilovačů [5]. Toto je důležité ve vláknových komunikacích, které používají několik signálů na různých vlnových délkách a dávají stejný poměr signál/šum na výstupu přijímače.

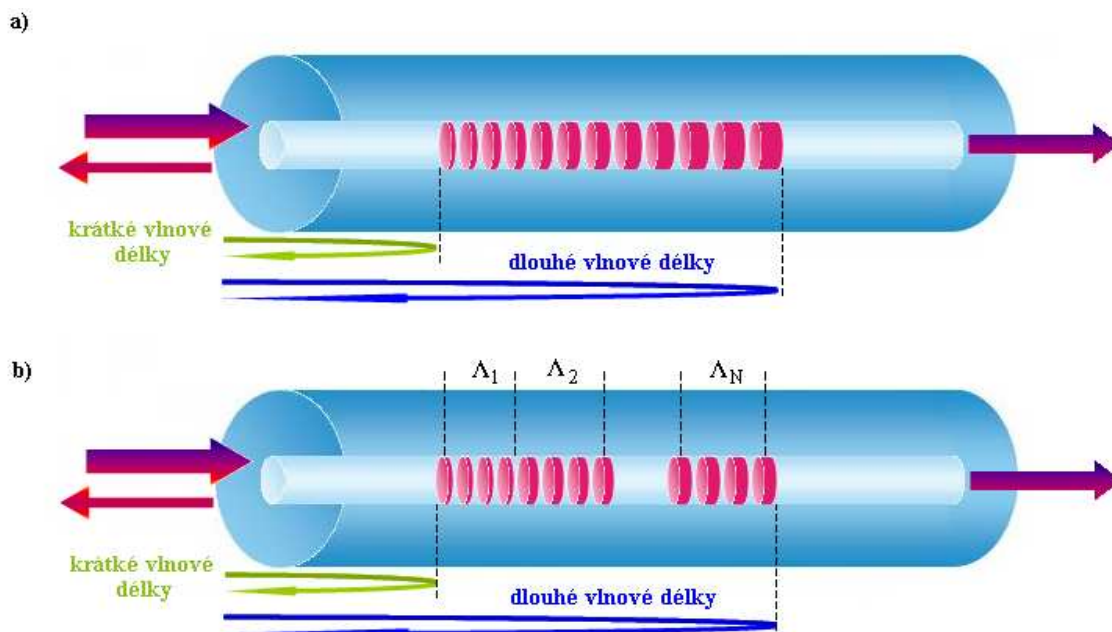
4.4 Chirpovaná Braggovská mřížka

Jedna z nejzajímavějších struktur Braggovských mřížek s okamžitou aplikací v telekomunikacích je chirpovaná mřížka, česky se jí také říká rozmítaná mřížka. Tato mřížka má monotónně se měnící periodu jak je zobrazeno na obrázku 25.

Jsou zde jisté charakteristické vlastnosti nabízené monotónně měnící se periodou mřížek, které jsou považovány za výhodné pro specifické aplikace v telekomunikacích a senzorové technologii, jako jsou rozptylová kompenzace a neproměnlivá syntéza zdrojů mnohanásobných vlnových délek. Tyto typy mřížek mohou být realizovány osově se měnící buď periodou mřížky Λ nebo indexem lomu jádra nebo obojím.

Mřížková struktura vyrobená ze skupiny menších délek stejných Braggovských mřížek rostoucích v periodě (pokud je vyrobena správně) může být využita k realizaci

širokopásmového reflektoru. Typicky k tomu má lineárně chirpovaná mřížka přidruženou chirpovanou hodnotu/jednotkovou délku (Λ_I) a počáteční periodu.



Obrázek 25: Základní schéma chirpované mřížky s plynule se měnící periodou mřížek (a);
Základní schéma kaskád několika mřížek s rostoucí periodou (b)

V opticky zesílených dálkových vysokorychlostních komunikačních systémech je hlavním omezením datového přenosu rozšiřování pulzu způsobené chromatickou disperzí. Rozšiřování pulzu může být eliminováno včleněním prvku, který má disperzi opačného signálu a stejnou velikost jako optický vláknový spoj. Optická vlákna zobrazující správnou zápornou disperzní charakteristiku byla začleněna do telekomunikačních spojů. Průměr módového pole kompenzačního vlákna zřídka souhlasí, proto spojování odlišných úseků vláken vyžaduje přípravu před tavením (zahřívání vlákna ke vzniku rozptylu dopantů, dokud překrytí módových polí není optimální). To může být dosaženo se zařízením pro svařování jednoduchých spojů, ačkoliv je výhodné se tomu vyhnout, zejména pokud je k dispozici přímá vláknová součást. U chirpovaných mřížek je rezonanční frekvence lineární funkcí osové polohy podél mřížky, takže odlišné frekvence přítomné v pulzu jsou odrazeny různými body a tak nabývá různých časových zpoždění. Nyní je možné zkomprimovat časově rozšířený pulz [5].

5 Princip měřicího přístroje

Přístroj WA-7100/7600 využívá Michelsonova interferometru ke generování interferenčních proužků ze vstupního záření. Vstupní laserový paprsek vstupuje do přístroje skrz vláknový optický konektor na předním panelu. Po kolimaci (svazkování) je paprsek směřován do Michelsonova interferometru. Na děliči paprsků je vstupní paprsek rozdělen do dvou paprsků, které postupují oddělenou optickou cestou. Jeden paprsek se odráží od pohyblivého zrcadla a vrací se k děliči paprsků. Druhý paprsek se odráží od pevného zrcadla a vrací se k děliči paprsků, kde interferuje s prvním paprskem. Intenzita světla dopadající na fotodetektor závisí na rozdílu trajektorií optických drah, která ovládá zda nastane konstrukční nebo destrukční interference na děliči paprsků. Jak se zrcadlo pohybuje tam a zpět, detekovaná intenzita každé vlnové délky vstupního paprsku se mění sinusově. Je-li dráhový rozdíl mezi trajektoriemi obou paprsků větší než vlnová délka, započítávají se příspěvky všech vlnových délek.

Aby bylo možné upravit vzorek spektrálních součástí vstupního paprsku z Michelsonova interferometru, je nezbytné navzorkovat detekovanou intenzitu přesně ze zkalirovaných intervalů ve snímku interferometru. Toho je dosaženo použitím druhého referenčního laseru s přesně známou vlnovou délkou do interferometru. Tento laser měří posunutí pohyblivé ručičky interferometru a poskytuje signál pro přené vzorkování vstupního laserového upraveného pásu.

Z jednoho snímku interferometru bylo nahráno velké množství hodnot intenzity a rychlá Fourierova transformace (FFT) vedla ke vzniku spektra vstupního laserového zdroje. Jak vlnová délka, tak poměrný výkon pro každou součást spektra byly získány z FFT.

Malá část vstupního paprsku vstupujícího do přístroje je oddělena a vedena do měřiče výkonu. Toto měření celkového vstupního výkonu spolu se spektrálním rozšířením z FFT je využito k výpočtu absolutního výkonu pro každou spektrální součást vstupního laserového zdroje.

Přesnost vlnové délky vrcholů ve spektru je závislá na znalosti vlnové délky referenčního laseru a příslušné korekce disperze indexu lomu vzduchu. WA 7100/7600 používá HeNe referenční laser s opravou indexu lomu založenou na teplotním a tlakovém měření uvnitř interferometru. Absolutní přesnost vlnové délky referenčního laseru je lepší než $0,5 \cdot 10^{-6}$ pro WA-7100 a $0,1 \cdot 10^{-6}$ pro WA-7600.

Přesnost vlnové délky závisí také na vyrovnávání paprsku referenčního laseru a vstupního laserového paprsku v Michelsonově interferometru. Vláknový optický vstup navazuje a stabilizuje opto-mechanický návrh zabezpečující, že interferometrové vyrovnání se významně nezmění s časem a podmínkami prostředí.

V čase průmyslové výroby je přesnost vlnové délky WA-7100/7600 ověřená přesně známým laserovým zdrojem jako je DFB laser.

Vnitřní měřič výkonu WA-7100/7600 je navržen s excelentní linearitou přes celý jmenovitý rozsah výkonu. Úprava citlivosti výkonového detektoru také zajišťuje, že plochost spolehlivého měření výkonu je dosažena přes provozní rozsah vlnových délek.

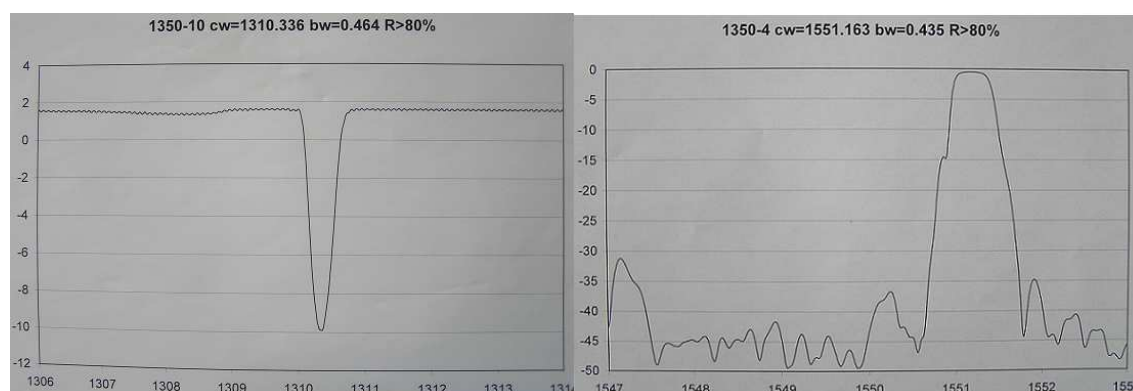
S kompletním spektrem normalizovaným do celkového výkonu měření, je výkon v každém peaku spočítaný ze sjednocené intenzity pod peakem poměrnou k průměrné lokální základní čáře.

Vnitřní měřič výkonu v každém WA-7100/7600 je kalibrován v průběhu výroby použitím vysoce přesného měřiče výkonu, který je pravidelně certifikován [6].

6 Mřížky buzené širokospektrálním laserem

6.1 Uspořádání a složení měřícího pracoviště

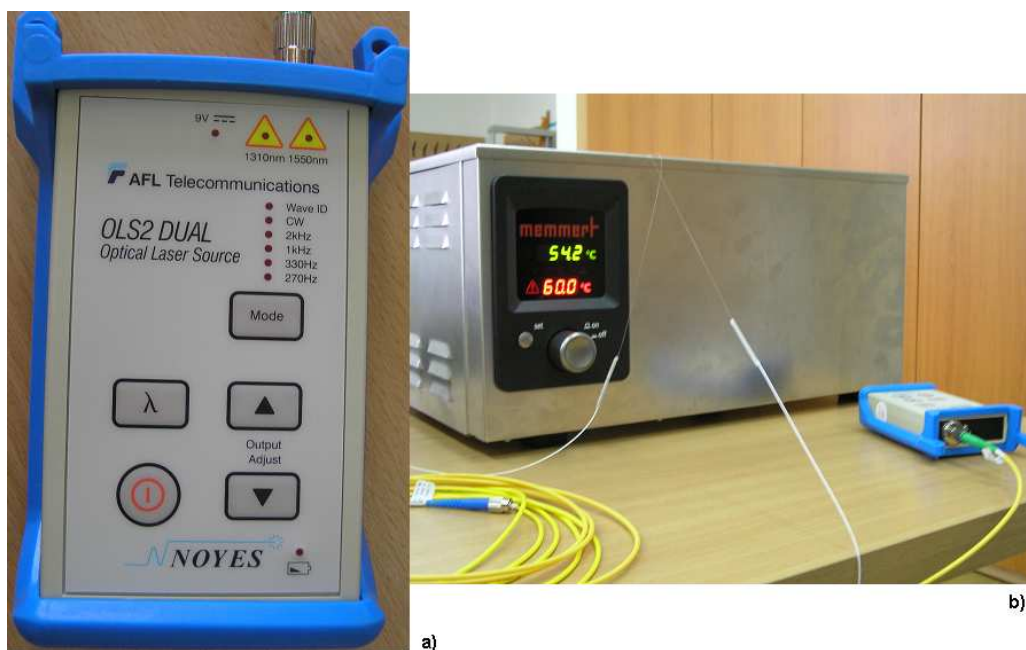
V optických vláknech mohou být vyrobeny Braggovské mřížky, ty se vypalují laserem na určitých vlnových délkách. Pro tento typ měření byly vybrány dvě vlákna se dvěmi Braggovskými mřížkami. V každém vlákně je jedna Braggovská mřížka, první optické vlákno má Braggovskou mřížku na vlnové délce 1310,336 nm a druhé vlákno má Braggovskou mřížku vypálenou na vlnové délce 1551,163 nm (obr.26). Těmto vlnovým délkám se říká Braggova vlnová délka. Optická vlákna mají pouze primární ochranu, nejsou chráněna žádným jiným způsobem. Jsou tedy velmi křehká a je potřeba s nimi manipulovat velmi opatrně.



Obrázek 26: Spektrální charakteristiky použitých Braggovských mřížek

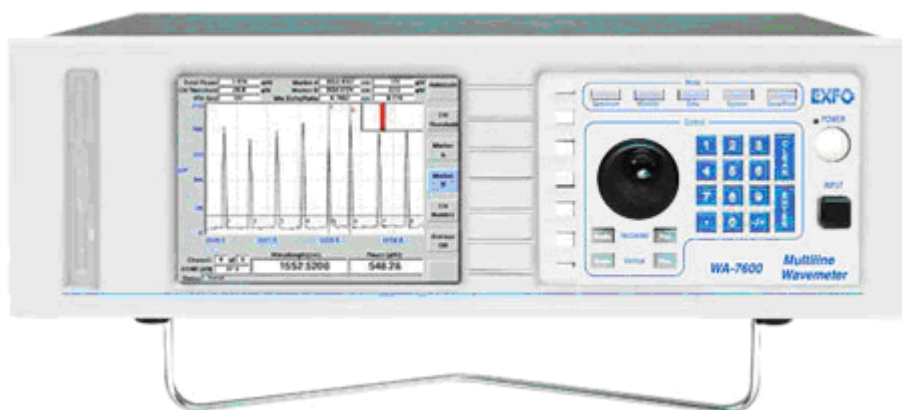
Je zde využito zdrojů optického záření (obr.27 (a)), které se běžně využívají na katedře telekomunikační techniky FEI VŠB - TUO pro standardní laboratorní měření ve výuce. Jedná se pouze o jeden přístroj, kde si můžeme zvolit na jaké vlnové délce má zdroj vydávat optické záření. Jde o vlnovou délku 1310 nm nebo 1550 nm. Jedná se o lasery s Fabry-Perot rezonátory, jejichž princip byl popsán v kapitole 3.3.

Dále jsem použila přístroj od firmy Memmert (obr.27 (b)) díky němuž lze právě měnit teplotu v okolí Braggovské mřížky. Jedná se o vodní lázeň, popř. je zde možnost napustit přístroj olejem, ale pro moje měření postačí pouze voda. Do nádrže s vodou je potřeba umístit další nádobku, ve které bude vložena ta část optického vlákna, kde je Braggovská mřížka vypálena. Musí být teplotně odolná a nepropustit kapalinu, mřížky jsou na vodu velmi citlivé, vlhkost by mohla nepříznivě ovlivnit měření. Dále je vhodné, aby nádoba byla uzavíratelná, z důvodu úniku tepla.



Obrázek 27: Laserový zdroj a); přístroj pro vodní lázeň b)

Poslední součástí měřicího pracoviště je přístroj WA-7100/7600 (obr.28) pro měření spektra vlnových délek a útlumu. Pracoviště je zapojeno tím způsobem, že na výstupu měřicího přístroje vidíme tu část spektra, která je Braggovskou mřížkou propuštěna.

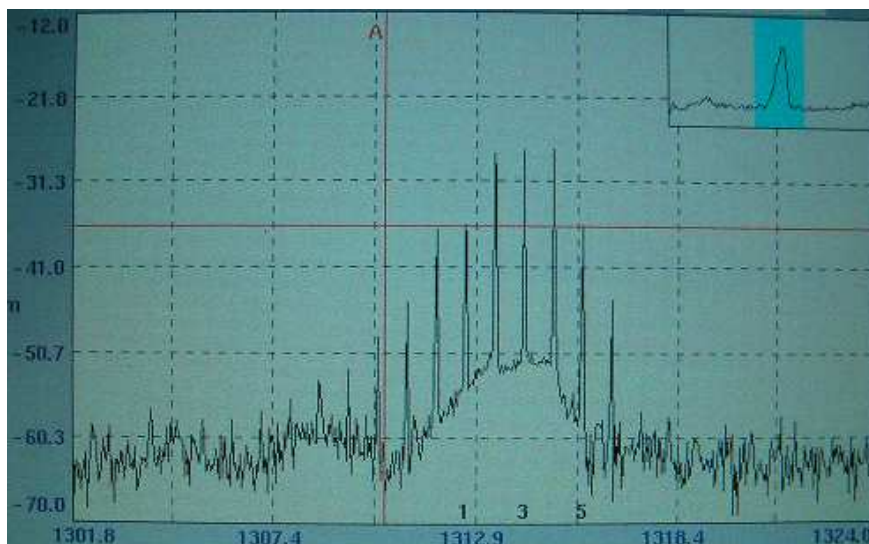


Obrázek 28: WA-7100/7600

6.2 Měření mřížky s Braggovskou vlnovou délkou 1310,336 nm

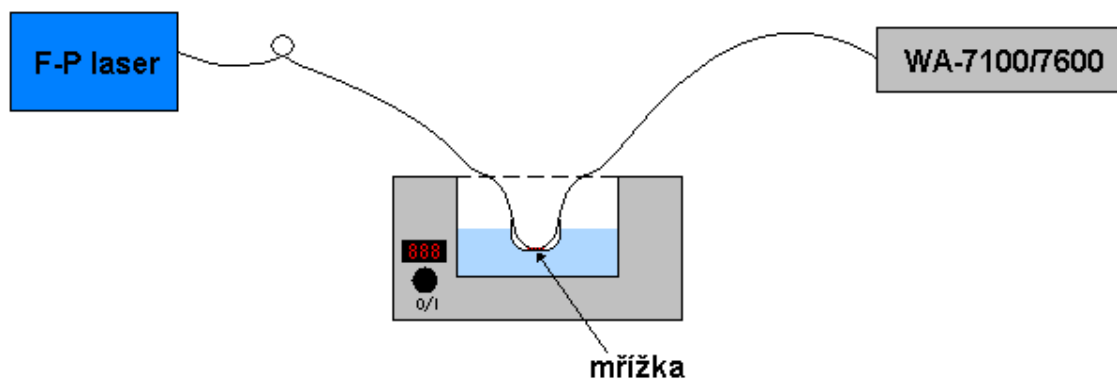
Než jsem zapojila pracoviště k měření charakteristiky mřížky, proměřila jsem charakteristiku širokospektrálního laseru (obr.29). Na obrázku vidíme spoustu peaků, o kterých

jsem se již zmínila v kapitole 3.3. Jsou způsobeny větším množstvím módů laseru. Právě tohoto laseru bylo u následujícího měření použito.



Obrázek 29: Spektrum Fabry – Perot laseru zářícím na vlnové délce 1310 nm

Poté bylo nutné zapojit pracoviště podle schéma zapojení měřícího pracoviště (obr.30). Tu část vlákna, která obsahuje Braggovskou mřížku jsem vložila do nádoby a nádobku vložila do vodní lázně.



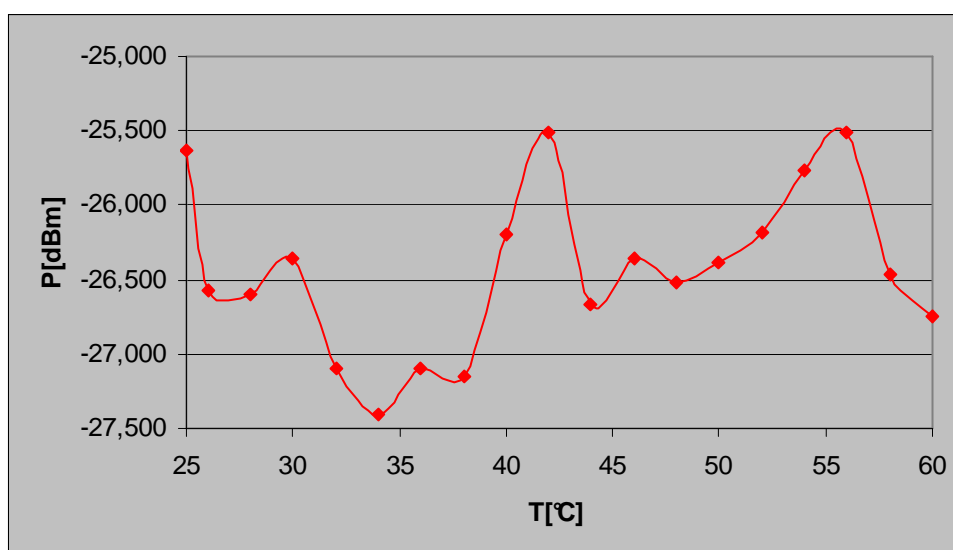
Obrázek 30: Zapojení měřícího pracoviště

Po uvedení měřícího pracoviště do provozu nastala problematická situace. Mřížka v optickém vlákne byla vytvořena na vlnové délce, která neodpovídala ani jednomu peaku ve spektru laseru. Na obrázku 29 je vlnová délka mřížky označena červenou čarou a značkou A. Proto nebylo možné měřit přesný útlum mřížky vlivem teploty ani její posun v oblasti vlnové

délky. Zvolila jsem proto alternativu a měřila celkový výkon, který projde vláknem. Měřicí přístroj bere průměrnou hodnotu výkonu z vybrané oblasti spektra. Jako počáteční teplotu měření jsem zvolila 25°C a po dvou stupních jsem vodní lázeň ohřívala až do konečné teploty měření 60°C. Měření jsme opakovala pětkrát, abych se vyhnula chybnému odečtu hodnot. Tato měření jsem zprůměrovala a výsledky měření jsem uvedla v tabulce 1, závislost výkonu, který mřížkou prošel, je uvedena v grafu 1. Z grafu lze vyčíst, že použití širokospektrálního laseru pro měření mřížek není ani trochu vhodné a v podstatě nijak nezjistíme jak se daná Braggovská mřížka chová. Je to způsobeno tím, že laser je nestabilní a jeho maximum záření není na vlnové délce, kde je vypálená mřížka.

T [°C]	P[dBm]	T [°C]	P[dBm]	T [°C]	P[dBm]	T [°C]	P[dBm]
25	-25,626	34	-27,408	44	-26,670	54	-25,766
26	-26,568	36	-27,100	46	-26,352	56	-25,512
28	-26,600	38	-27,146	48	-26,514	58	-26,462
30	-26,364	40	-26,200	50	-26,390	60	-26,748
32	-27,094	42	-25,516	52	-26,186	-	-

Tabulka 1: Průměrné hodnoty výkonu mřížky s vlnovou délkou 1310,336 nm

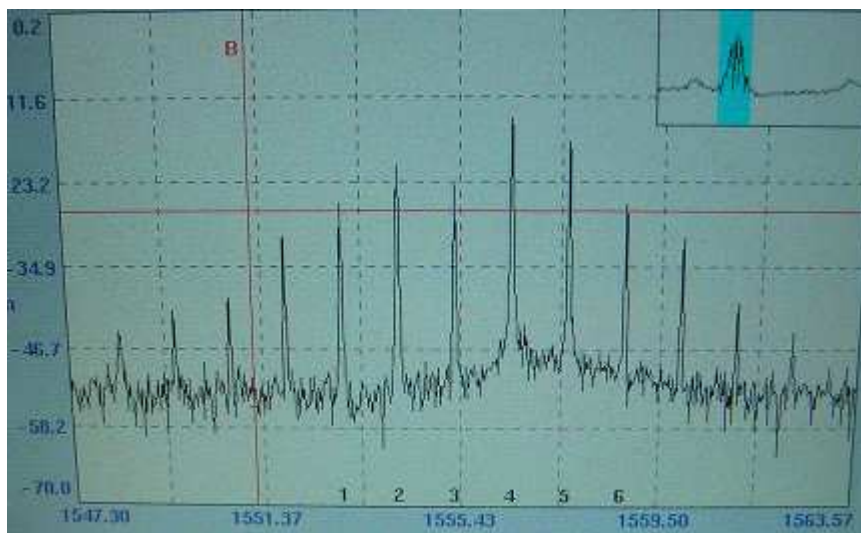


Graf 1: Závislost prošlého výkonu mřížkou na teplotě

6.3 Měření mřížky s Braggovskou vlnovou délkou 1551,163 nm

Na začátek měření následující Braggovské mřížky jsem opět proměřila zdroj použitého optického záření. Spektrum optického záření na vlnové délce 1550 nm bylo víceméně stejné

jako u záření na vlnové délce 1310 nm, opět se ve spektru objevila spousta maxim jak je vidět na obrázku 31.



Obrázek 31: Spektrum Fabry-Perot laseru zářícím na vlnové délce 1550 nm

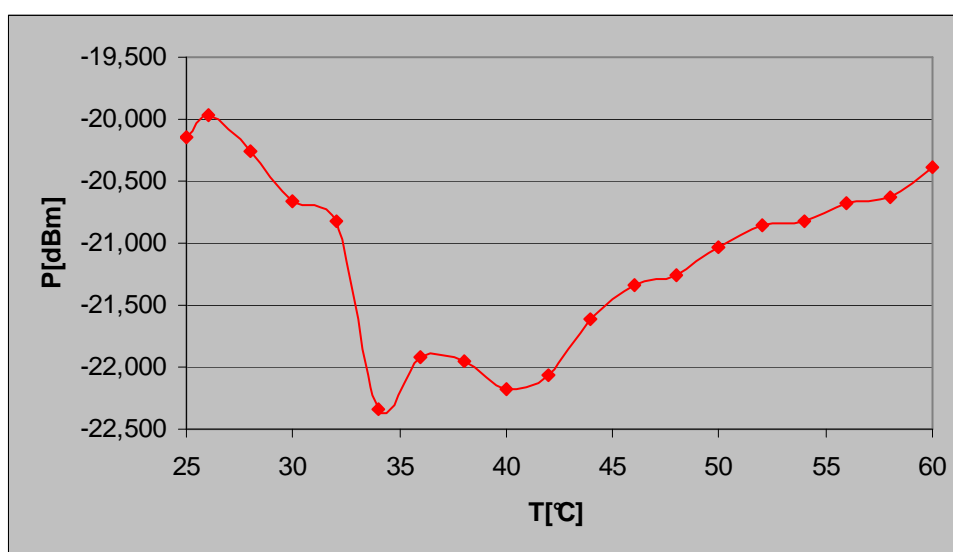
Zapojení měřicího pracoviště je stejné jako u předchozího měření, vycházíme tedy z obrázku 30. Pouze místo vlákna s Braggovskou mřížkou na vlnové délce 1310,336 nm bylo použito vlákno s Braggovskou mřížkou na vlnové délce 1551,163 nm. Měření probíhalo stejným způsobem jako předchozí. Mřížka opět nebyla vyrobena na vlnové délce, která by se shodovala s některým maximem ve spektru laseru. To je vidět na obrázku 31, mřížka je vyznačena červenou čarou ve spektru s označením B.

Opět nebylo možné změřit přesný posun vlnové délky mřížky vlivem oteplování Braggovské mřížky, ani vliv teploty na zvýšení útlumu. Opět jsem zvolila alternativu a měřila celkový výkon, který projde vláknem. Stejně jako v předchozím případě jsem odečítali průměrnou hodnotu výkonu z vybrané oblasti spektra. Rozsah teplot u měření byl zvolen stejně, tedy 25°C – 60°C. Měření jsme opakovala znovu pětkrát. Naměřené hodnoty jsou opět zprůměrované a výsledky uvedené v tabulce 2. Závislost výkonu, který mřížkou prošel, je uvedena v grafu 2. Na grafu lze vidět, že se určitá část závislosti chová lineárně. Je to v oblasti, kdy už byla mřížka zahřátá na 40°C, a její útlum relativně lineárně klesá zpět k původní hodnotě. Je tedy možné, že by se pro některé mřížkové aplikace daly použít i širokospektrální lasery, i když by bylo vhodné nejprve zaměřit výzkum na tuto oblast. Je možné, že při více testech a opakovaných měřeních by se zjistilo, že tyto hodnoty byly pouze chybou měření. Bylo

by to i více pravděpodobné vzhledem k výsledkům z předchozího měření, kde byl použit stejný zdroj pouze s jinou vlnovou délkou a žádná použitelná lineární závislost se zde neobjevila.

T [°C]	P[dBm]	T [°C]	P[dBm]	T [°C]	P[dBm]	T [°C]	P[dBm]
25	-20,142	34	-22,334	44	-21,612	54	-20,828
26	-19,964	36	-21,912	46	-21,332	56	-20,682
28	-20,256	38	-21,958	48	-21,264	58	-20,622
30	-20,656	40	-22,170	50	-21,026	60	-20,380
32	-20,830	42	-22,068	52	-20,860	-	-

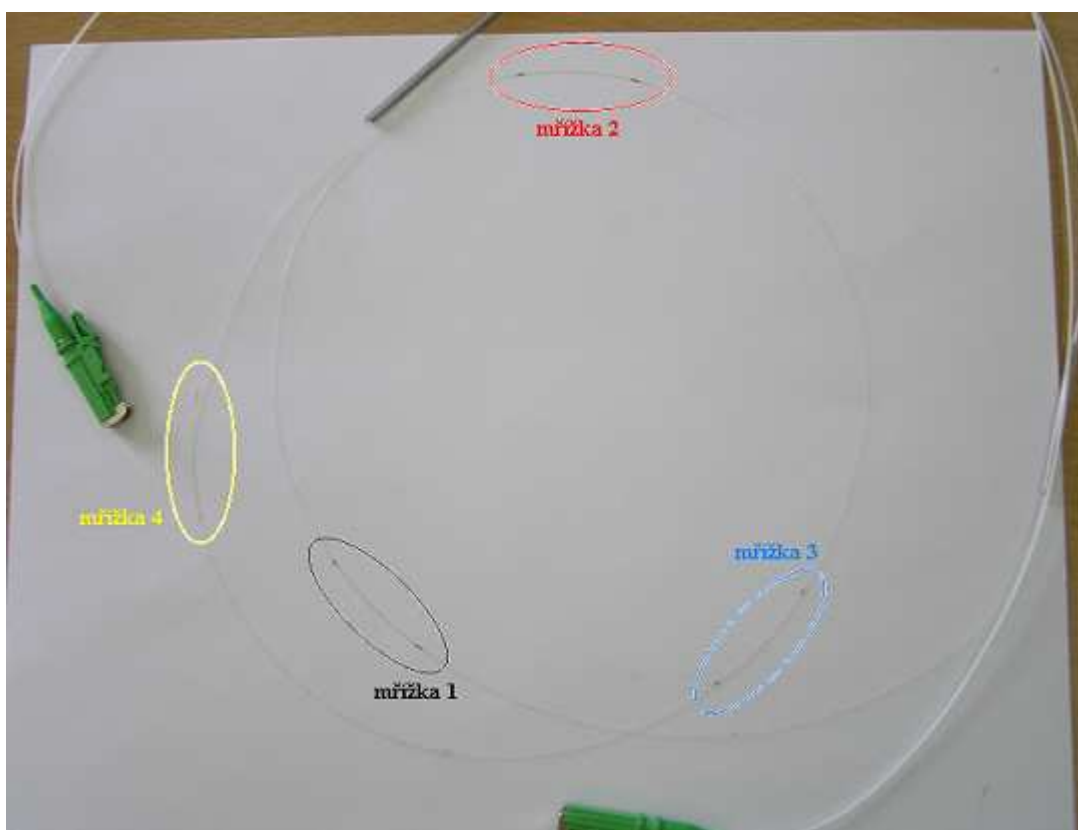
Tabulka 2: Průměrné hodnoty výkonu mřížky s vlnovou délkou 1551,136 nm



Graf 2: Závislost prošlého výkonu mřížkou na teplotě

7 Mřížky buzené DFB laserem

Při měření této části diplomové práce využiji pouze jednoho optického vlákna, které má v sobě na určitých vlnových délkách vypáleny čtyři mřížky (obr.32). První mřížka je na vlnové délce 1533,234 nm, druhá mřížka je vypálena na vlnové délce 1544,872 nm, třetí mřížka má Braggovu vlnovou délku 1553,522 nm a poslední čtvrtá mřížka má vlnovou délku 1559,472 nm. Tyto mřížky budou proměřovány každá zvlášť a poté jejich různé kombinace, z kombinací jsem zvolila první a druhou mřížku, dále kombinaci třetí a čtvrté mřížky a v poslední části bude proměřena kombinace všech čtyřech mřížek.



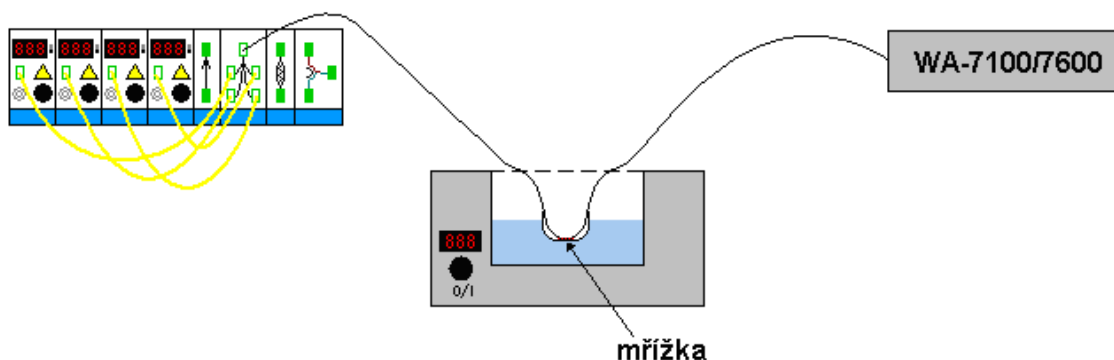
Obrázek 32: Mřížky využívané k měření

7.1 Uspořádání a složení měřicího pracoviště

K měření bude využito výše popsaného vlákna. Toto vlákno bude buzené DFB laserem, jehož princip byl popsán v kapitole 3.4. K tomu využijeme WDM sestavy od firmy Safibra, která se mj. skládá ze čtyř DFB laserů, které potřebujeme pro buzení jednotlivých mřížek. Tyto lasery jsou na vlnových délkách 1533 nm, 1545 nm, 1553 nm, 1560 nm. Další částí přístroje,

kterou využijeme je coupler 1 x 4. Protože každá mřížka je na jiné vlnové délce, a pro naše měření je třeba je budít lasery na oněch vlnových délkách a navíc současně, je potřeba právě zmíněného coupleru. Ten tuto funkci umožňuje.

Ostatní přístroje, které budou využité pro měření jsme již zmínili v kapitole 6.1. Způsob zapojení měřicího pracoviště (obr.33) bude pro všechna následující měření stejná.

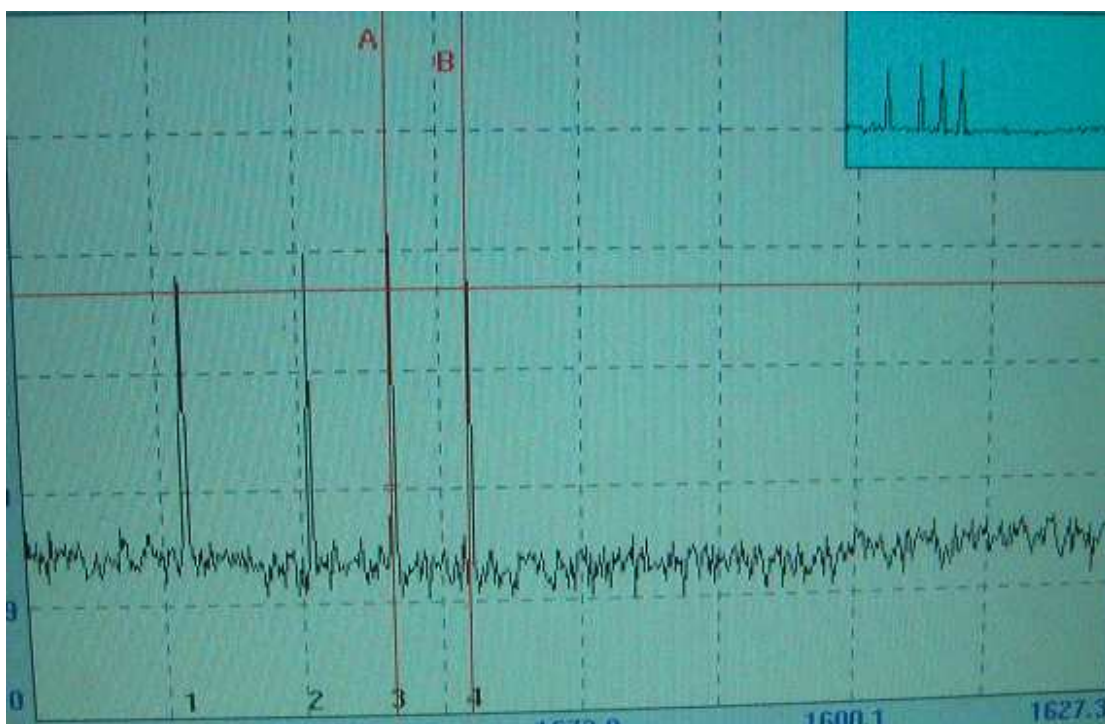


Obrázek 33: Zapojení měřicího pracoviště

7.2 Mřížka s vlnovou délkou 1533,234 nm

Po zapojení měřicího pracoviště jsem upevnila mřížku do nádoby, tak aby nebyla nikde ohnutá, protože by to mohlo zkreslovat měření. Je potřeba nastavit vstupní úrovně signálů tak, aby hodnoty útlumu každé mřížky byly přibližně stejné. První laser jsem nastavila na hodnotu 10,1 V, druhý laser na 14,4 V, třetí na hodnotu 20,0 V a poslední na hodnotu 32,3 V. V průběhu všech následujících měření jsem se snažila vždy nastavit vstupní úrovně signálů na stejnou hodnotu jako u prvního, nešlo ani tak moc o vstupní napětí, jako o úroveň útlumu. Vstupní úroveň útlumu byla nastavena pokaždé na -20,884 dBm.

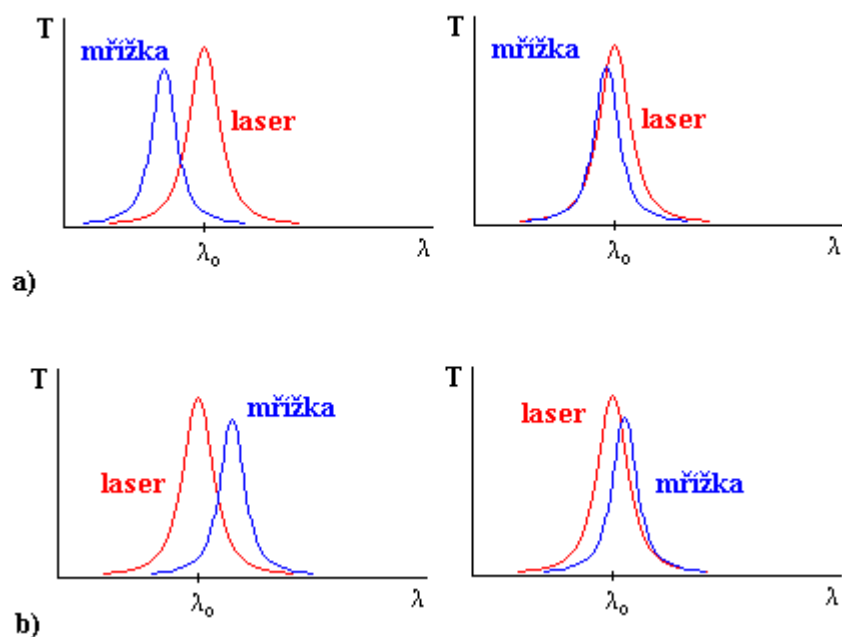
Nejdříve jsem proměřila pouze spektrum laseru, abych viděla jak se ve skutečnosti liší od spektra širokospektrálního laseru. Spektra těchto laserů můžeme vidět na obrázku 34. Je zřejmé, že na rozdíl od FP laseru mají tyto lasery pouze jedno maximum. Lasery s takovou spektrální charakteristikou se výborně hodí pro tento typ měření.



Obrázek 34: Spektrum čtyřech DFB laserů

Jelikož nebylo možné dopředu odhadnout vliv teploty na chování mřížky, bylo rozhodnuto, že první měření provedu pětikrát a podle výsledků se rozhodnu, jaký postup bude zvolen u ostatních měření Braggovských mřížek. Teplotu v okolí mřížek nebylo vhodné měnit moc rychle, protože mřížky reagovaly trochu pomaleji.

Bohužel se už u prvního opakování měření ukázalo, že u všech mřížek bude potřeba měření opakovat, jelikož nastala neočekávaná situace. Hned na začátku druhého měření se ukázalo, že vlnová délka mřížky se nevrací na svoji původní hodnotu, ale postupně při každém dalším ohřívání narůstá. Až v průběhu pátého měření se nárůst vlnové délky zastavil a začal se vracet nazpět. Je to způsobeno tím, že mřížka se s postupným ohříváním rozpíná a tím se mění vzdálenost odrazivých plošek mřížky, tím se zároveň i mění Braggova rezonanční vlnová délka. Ani tato Braggovská mřížka však není vyrobena přesně na rezonanční vlnové délce laseru. Rezananční vlnová délka mřížky tedy postupně narůstá a přibližuje se rezonanční vlnové délce laseru (obr.35 (a)), tu pomalu přejde a začne se zase vracet (obr.35 (b)) a tak osciluje okolo rezonanční vlnové délky laseru.

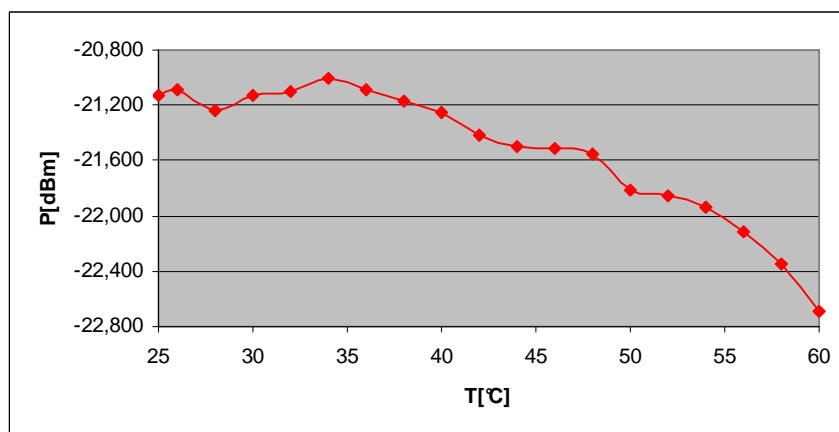


Obrázek 35: Posunování rezonanční vlnové délky mřížky

Naměřené hodnoty jsem nakonec zprůměrovala a zaznamenala do tabulky 3. Hodnoty všech pěti měření jsou uvedeny v příloze 1. Závislost útlumu mřížky na teplotě je zaznamenána v grafu 3, graf teplotní závislosti je uveden v příloze 1. Výkon prošlý mřížkou vlivem zvyšování teploty klesl zhruba o 1,5 dBm, což je asi 30%. Útlum narůstal vcelku lineárně, dalším důležitým poznatkem z měření je, že při opakovaném měření se nárůst útlumu postupně ustaloval. Zatímco u prvního měření je útlum asi 4 dBm, u posledního je to už pouhých 0,6 dBm. Z prvního měření se dá usoudit, že mřížky nejsou využitelné v oblasti, kde dochází k rychlým změnám teplot.

T [°C]	λ [nm]	P[dBm]	T [°C]	λ [nm]	P[dBm]
25	1534,013	-21,132	44	1534,033	-21,504
26	1534,015	-21,092	46	1534,036	-21,510
28	1534,015	-21,241	48	1534,036	-21,555
30	1534,018	-21,134	50	1534,039	-21,819
32	1534,020	-21,096	52	1534,039	-21,856
34	1534,023	-21,010	54	1534,039	-21,941
36	1534,026	-21,086	56	1534,038	-22,118
38	1534,029	-21,177	58	1534,044	-22,345
40	1534,031	-21,256	60	1534,044	-22,693
42	1534,031	-21,420	-	-	-

Tabulka 3: Průměrné hodnoty útlumu mřížky s vlnovou délkou 1533,234 nm



Graf 3: Závislost útlumu mřížky na teplotě

7.3 Mřížka s vlnovou délkou 1544,872 nm

U druhé mřížky se zapojení nezměnilo, pouze byla do nádoby vložena druhá mřížka s rezonanční vlnovou délkou 1544,872 nm. Postup měření se opakoval jen s tím rozdílem, že již bylo zřejmé, že se tato měření budou muset opakovat pětkrát.

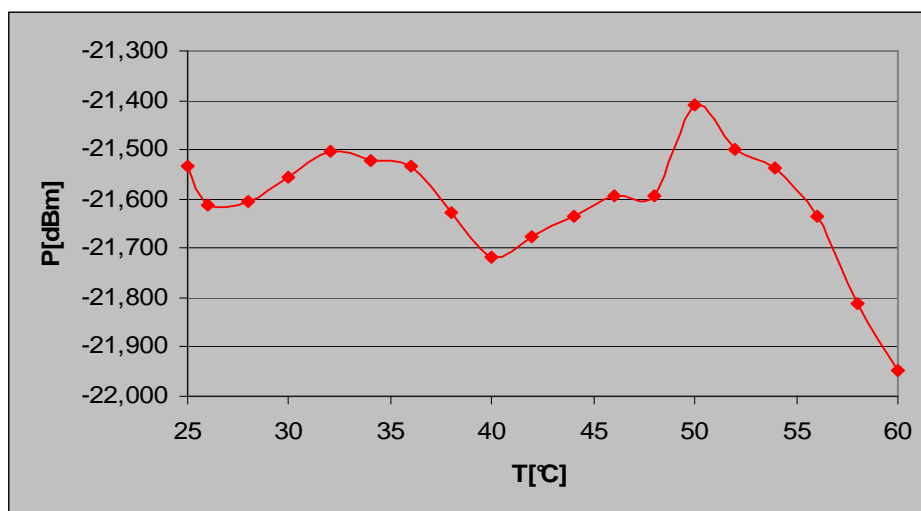
Při postupném ohřívání mřížky opět narůstala vlnová délka jako v předchozím případě, ale s tím rozdílem, že narůstala velmi pozvolna a nezaznamenala jsem žádný pokles na nižší hodnotu. To bude způsobeno tím, že jsem se s mřížkou nepřiblížila na rezonanční vlnovou délku laseru.

Hodnoty v tabulce 4 jsou průměrné. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 1. Závislost útlumu mřížky na teplotě je v grafu 4, graf teplotní závislosti je uveden v příloze 1.

T [°C]	λ [nm]	P[dBm]	T [°C]	λ [nm]	P[dBm]
25	1545,787	-21,534	44	1545,805	-21,635
26	1545,787	-21,613	46	1545,806	-21,594
28	1545,793	-21,605	48	1545,808	-21,594
30	1545,796	-21,558	50	1545,808	-21,408
32	1545,796	-21,502	52	1545,808	-21,498
34	1545,796	-21,524	54	1545,808	-21,538
36	1545,796	-21,532	56	1545,808	-21,634
38	1545,798	-21,628	58	1545,809	-21,812
40	1545,802	-21,717	60	1545,813	-21,948
42	1545,804	-21,676	-	-	-

Tabulka 4: Průměrné hodnoty útlumu mřížky s vlnovou délkou 1544,872 nm

Chování mřížky je v tomto případě velmi nestandardní a nestabilní. Bohužel toto chování se opakovalo při každém opakovaném měření. Všechny mřížky byly měřeny stejným způsobem, takže lze vyloučit chybu měření. Z průběhu grafu lze říct, že tato mřížka se nehodí pro jakoukoliv aplikaci, kde by mohla nastat změna teploty. Je možné že u mřížky nastala chyba při výrobě a proto se tak chová.



Graf 4: Závislost útlumu mřížky na teplotě

7.4 Mřížka s vlnovou délkou 1553,522 nm

Třetí mřížka s rezonanční vlnovou délkou 1553,522 nm byla vložena do nádoby, postup měření byl shodný s předchozími.

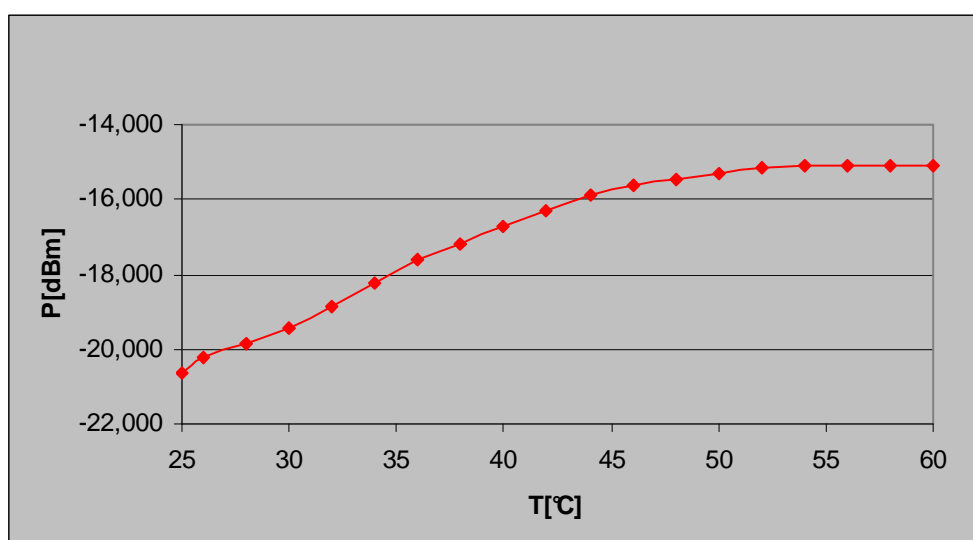
U měření této Braggovské mřížky se oproti předchozím vlnová délka při postupném ohřívání ani jednou nezměnila. Po celou dobu měření zůstala na vlnové délce 1553,472 nm. Je to pravděpodobně způsobené tím, že mřížka si již prošla pěti teplotními cykly a její hodnota vlnové délky se teplotním působením ustálila.

Průběh poklesu útlumu je v tomto případě naprosto ukázkový. Je zde rozdíl oproti předcházejícím měřením, protože v jejich případě útlum narůstal. To je způsobeno tím, že mřížka se nacházela na počátku měření na vyšší hodnotě než je rezonanční vlnová délka laseru (obr.36 (b)).

Hodnoty v tabulce 5 jsou průměrné. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 1. Závislost útlumu mřížky na teplotě je v grafu 5, graf teplotní závislosti je uveden v příloze 1.

T [°C]	λ [nm]	P[dBm]	T [°C]	λ [nm]	P[dBm]
25	1553,472	-20,644	44	1553,472	-15,885
26	1553,472	-20,202	46	1553,472	-15,644
28	1553,472	-19,861	48	1553,472	-15,443
30	1553,472	-19,459	50	1553,472	-15,283
32	1553,472	-18,857	52	1553,472	-15,162
34	1553,472	-18,254	54	1553,472	-15,082
36	1553,472	-17,612	56	1553,472	-15,082
38	1553,472	-17,210	58	1553,472	-15,082
40	1553,472	-16,728	60	1553,472	-15,082
42	1553,472	-16,287	-	-	-

Tabulka 5: Průměrné hodnoty útlumu mřížky s vlnovou délkou 1553,522 nm



Graf 5: Závislost útlumu mřížky na teplotě

7.5 Mřížka s vlnovou délkou 1559,472 nm

Poslední Braggovská mřížka s vlnovou délkou 1559,472 nm byla proměřena stejným způsobem jako první tři.

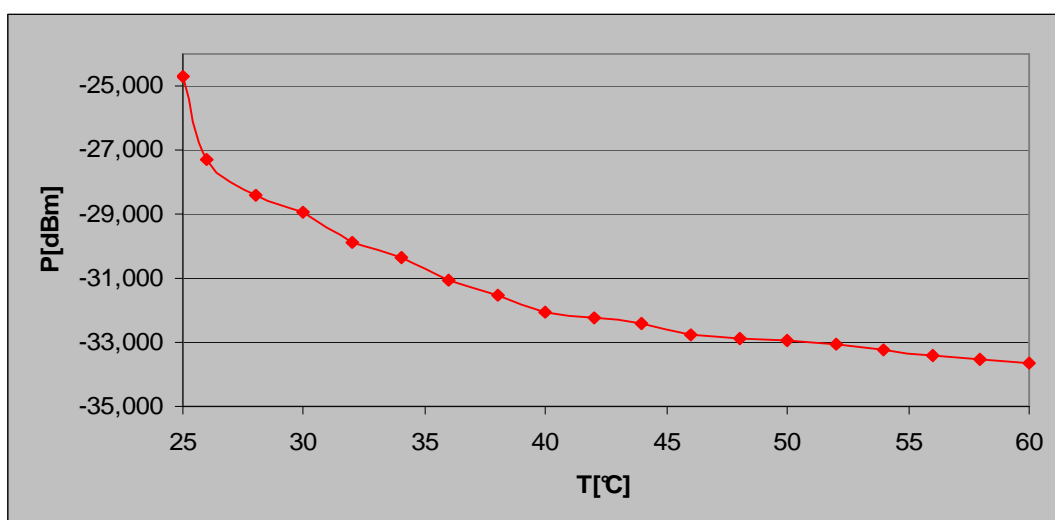
Čtvrtá mřížka se chovala ukázkově, její vlnová délka postupně narůstala s teplotou jako v prvním případě. Dostala se až na rezonanční vlnovou délku laseru a začala zase klesat. Po prvním měření mřížky jsem měření přerušila a s měřením pokračovala až druhý den. Když jsem

druhý den mřížku začala proměřovat, její vlnová délka byla nižší než předešlého dne. To bylo pravděpodobně způsobeno jiným vstupním napětím, i když se mohlo lišit pouze o $\pm 0,3$ V. Vstupní úroveň signálu se nelišila od předchozích měření, tu jsem doladila vždy přesně. U dalších měření toho dne mřížka již zvyšovala svoji rezonanční vlnovou délku. Díky přerušení tohoto měření jsem si ověřila, že rezonanční vlnová délka mřížek se vrací na svoji původní hodnotu, ale trvá to řádově několik hodin.

Průměrné hodnoty jsou uvedené v tabulce 6, hodnoty naměřené jsou opět uvedeny v příloze 1. Závislost útlumu mřížky na teplotě je v grafu 6, graf teplotní závislosti je uveden v příloze 1.

T [°C]	λ [nm]	P[dBm]	T [°C]	λ [nm]	P[dBm]
25	1560,579	-24,706	44	1560,681	-32,409
26	1560,598	-27,301	46	1560,682	-32,793
28	1560,612	-28,402	48	1560,687	-32,872
30	1560,618	-28,949	50	1560,690	-32,962
32	1560,636	-29,856	52	1560,690	-33,079
34	1560,640	-30,379	54	1560,692	-33,231
36	1560,655	-31,053	56	1560,694	-33,383
38	1560,662	-31,544	58	1560,695	-33,520
40	1560,673	-32,082	60	1560,697	-33,654
42	1560,681	-32,217			

Tabulka 6: Průměrné hodnoty útlumu mřížky s vlnovou délkou 1553,522 nm



Graf 6: Závislost útlumu mřížky na teplotě

7.6 Kombinace všech čtyřech mřížek

Tato část měření byla provedena jako druhá (hned po proměření charakteristiky první mřížky), i když je zde uvedena až jako pátá. V této fázi jsem se rozhodla proměřit všechny čtyři mřížky současně. Všechny byly umístěny do nádoby a postupně zatěžovány vzrůstající teplotou.

Rezonanční vlnové délky všech čtyřech mřížek kolísaly v průběhu měření okolo rezonančních vlnových délek laserů.

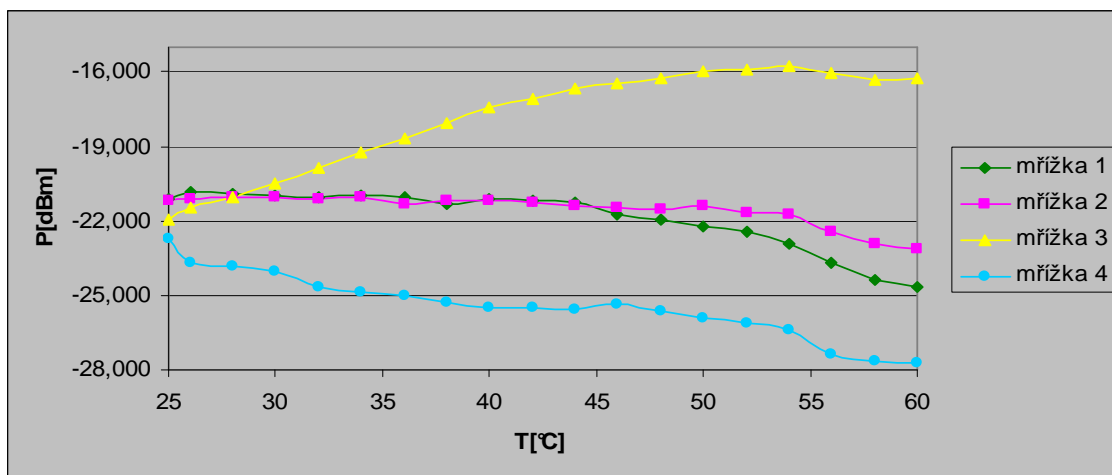
U první mřížky útlum až na nepatrné výkyvy na nižších hodnotách teploty narůstá. Nárůst útlumu mřížky se pohybuje okolo hodnoty 3,6 dBm. U druhé mřížky probíhá kolísání již ve větší oblasti, nárůst útlumu je cca o 2 dBm. U třetí mřížky dochází na rozdíl od prvních k poklesu útlumu, zdůvodněno to bylo již v kapitole 7.4. U průměrných hodnot čtvrté mřížky dochází k postupnému navýšení útlumu asi tak o 5 dBm.

Domnívám se, že mřížky se nijak vzájemně neovlivňují pokud jsou vystavovány změnám teplot. Při porovnání všech naměřených hodnot v průběhu celého měření se mřížky nechovaly nijak odlišně jako když byly vystavovány změnám teplot samostatně.

T [°C]	λ_1 [nm]	P1[dBm]	λ_2 [nm]	P2[dBm]	λ_3 [nm]	P3[dBm]	λ_4 [nm]	P4[dBm]
25	1533,973	-21,130	1545,674	-21,159	1553,489	-21,920	1560,709	-22,717
26	1533,975	-20,864	1545,677	-21,084	1553,490	-21,484	1560,720	-23,662
28	1533,966	-20,916	1545,669	-21,051	1553,489	-21,066	1560,703	-23,831
30	1533,964	-21,009	1545,665	-21,053	1553,475	-20,514	1560,699	-24,065
32	1533,965	-21,042	1545,668	-21,093	1553,475	-19,838	1560,707	-24,676
34	1533,964	-20,999	1545,668	-21,070	1553,473	-19,231	1560,706	-24,858
36	1533,965	-21,048	1545,669	-21,341	1553,473	-18,675	1560,708	-25,035
38	1533,966	-21,315	1545,670	-21,161	1553,473	-18,084	1560,707	-25,307
40	1533,968	-21,139	1545,674	-21,179	1553,474	-17,436	1560,711	-25,497
42	1533,966	-21,212	1545,675	-21,249	1553,474	-17,072	1560,711	-25,488
44	1533,967	-21,257	1545,673	-21,370	1553,473	-16,700	1560,713	-25,550
46	1533,970	-21,728	1545,674	-21,442	1553,473	-16,430	1560,715	-25,371
48	1533,971	-21,924	1545,683	-21,520	1553,472	-16,273	1560,716	-25,612
50	1533,975	-22,226	1545,688	-21,411	1553,472	-15,956	1560,723	-25,934
52	1533,993	-22,419	1545,690	-21,651	1553,473	-15,890	1560,725	-26,130
54	1533,985	-22,910	1545,697	-21,740	1553,472	-15,733	1560,731	-26,389
56	1533,990	-23,719	1545,698	-22,439	1553,472	-16,032	1560,733	-27,350
58	1533,992	-24,352	1545,699	-22,955	1553,472	-16,322	1560,739	-27,640
60	1533,996	-24,693	1545,699	-23,112	1553,473	-16,286	1560,742	-27,688

Tabulka 7: Průměrné hodnoty vlnových délek a útlumu všech čtyřech mřížek

Průměrné hodnoty všech proměřených mřížek lze vidět v tabulce 7 a průběh závislosti útlumu na postupném zvyšování teploty v grafu 7. Všechny naměřené hodnoty a vygenerované grafy jsou k vidění v příloze 1.



Graf 7: Závislosti útlumu mřížek na zvyšování teploty

7.7 Kombinace dvou prvních mřížek

V další části diplomové práce jsem se rozhodla proměřit kombinace Braggovských mřížek. První zvolenou kombinací je první a druhá mřížka s vlnovými délkami 1533,234 nm a 1544,872 nm. Ty byly opět umístěny do nádoby pro měření.

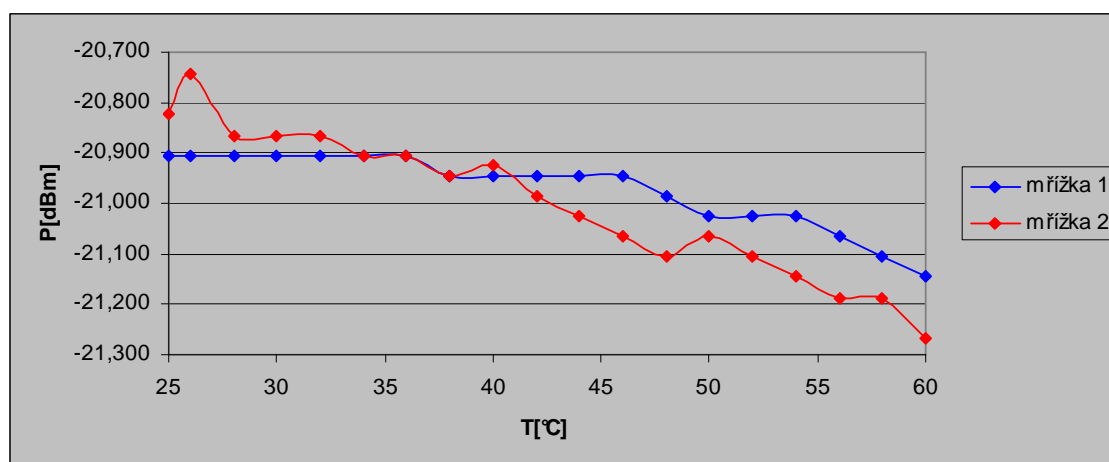
U těchto mřížek nastala situace jako u měření třetí mřížky a to ta, že se vlnová délka první mřížky v průběhu pěti cyklů oteplování nezměnila. U druhé mřížky se vlnová délka pohybovala směrem vzhůru pouze u prvního měření a jakmile dosáhla určité vlnové délky, zůstala nezměněná po celou dobu dalších měření. Tyto mřížky prošly již několika teplotními cykly, takže je možné, že vlivem opakovaného teplotního zatěžování se jejich vlnová délka ustálila na konkrétní hodnotě.

Dalším zajímavým zjištěním bylo, že hodnota útlumu kolísala pouze v průměru okolo 0,2 dBm u první mřížky a při dalších teplotních cyklech se opět ustalovala na jedné hodnotě a téměř se neměnila. U druhé mřížky kolísala hodnota útlumu trochu víc než u první mřížky, ale ani tyto změny nebyly nijak markantní, druhého měření to bylo 1,2 dBm a v posledním měření to byly pouhé 0,3 dBm. Vzhledem k výsledkům měření se nedomnívám, že by se tyto dvě mřížky při teplotním zatěžování nějak ovlivňovaly.

Průměrné hodnoty lze vidět v tabulce 8, křivku závislosti útlumu na teplotě v grafu 8. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 1, stejně tak jako zbylé grafy závislostí vlnové délky na teplotě.

T [°C]	λ_1 [nm]	P[dBm]	λ_2 [nm]	P[dBm]	T [°C]	λ_1 [nm]	P[dBm]	λ_2 [nm]	P[dBm]
25	1534,144	-20,905	1545,856	-20,825	44	1534,144	-20,945	1545,856	-21,025
26	1534,144	-20,905	1545,856	-20,744	46	1534,144	-20,945	1545,856	-21,066
28	1534,144	-20,905	1545,855	-20,865	48	1534,144	-20,985	1545,856	-21,106
30	1534,144	-20,905	1545,855	-20,865	50	1534,144	-21,026	1545,856	-21,066
32	1534,144	-20,905	1545,855	-20,865	52	1534,144	-21,026	1545,856	-21,106
34	1534,144	-20,905	1545,855	-20,905	54	1534,144	-21,026	1545,856	-21,146
36	1534,144	-20,905	1545,856	-20,905	56	1534,144	-21,066	1545,856	-21,186
38	1534,144	-20,945	1545,856	-20,945	58	1534,144	-21,106	1545,856	-21,186
40	1534,144	-20,945	1545,856	-20,925	60	1534,144	-21,146	1545,856	-21,267
42	1534,144	-20,945	1545,856	-20,985					

Tabulka 8: Průměrné hodnoty útlumu první a druhé mřížky



Graf 8: Závislost útlumu mřížek na teplotě

7.8 Kombinace dvou posledních mřížek

Posledním měřením byla kombinace dvou posledních mřížek na vlnových délkách 1553,522 nm a 1559,472 nm.

U třetí mřížky byla situace úplně stejná jako při jejím prvním měření, její vlnová délka zůstala po celou dobu měření nezměněná. U čtvrté mřížky docházelo postupně k nárůstu

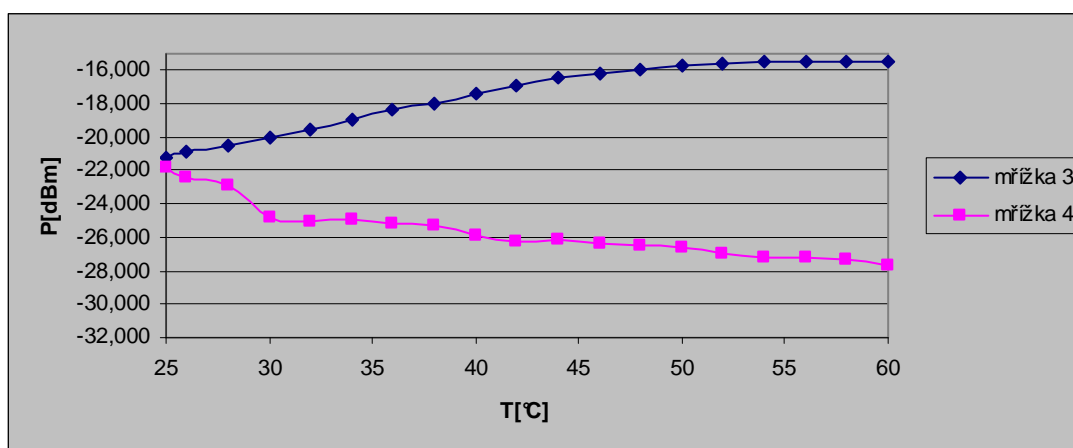
rezonanční vlnové délky až do pátého cyklu, kdy se mřížka zastavila na konkrétní hodnotě a dál se již nepohybovala žádným směrem.

U třetí mřížky docházelo opět ke snížení útlumu jako u jejího předchozího proměřování. Její chování v tomto směru zůstalo nezměněno. Útlum čtvrté mřížky kolísal u každého měření jinak. U prvního měření útlum silně narůstal, celkem až o 18 dBm. Vzhledem k neobvyklému nárůstu hodnoty je možné, že došlo k chybě měření. U dalších měření postupně velikost útlumu klesala až do posledního opakování, kdy byl nárůst útlumu již pouze okolo 1dBm.

Průměrné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 9 a grafy závislostí jednotlivých útlumů mřížek na teplotě v grafu 9. Naměřené hodnoty jsou v příloze 1, stejně tak jako grafy závislostí vlnové délky na teplotě.

T [°C]	λ_3 [nm]	P[dBm]	λ_4 [nm]	P[dBm]	T [°C]	λ_3 [nm]	P[dBm]	λ_4 [nm]	P[dBm]
25	1553,473	-21,175	1560,706	-21,840	44	1553,473	-16,437	1560,746	-26,103
26	1553,473	-20,866	1560,714	-22,381	46	1553,473	-16,180	1560,751	-26,388
28	1553,473	-20,501	1560,714	-22,874	48	1553,473	-15,964	1560,756	-26,441
30	1553,473	-20,018	1560,719	-24,766	50	1553,473	-15,703	1560,758	-26,620
32	1553,473	-19,536	1560,726	-25,078	52	1553,473	-15,617	1560,761	-26,921
34	1553,473	-18,954	1560,732	-24,945	54	1553,473	-15,532	1560,754	-27,179
36	1553,473	-18,363	1560,736	-25,166	56	1553,473	-15,441	1560,766	-27,194
38	1553,473	-17,956	1560,739	-25,334	58	1553,473	-15,441	1560,766	-27,359
40	1553,473	-17,347	1560,742	-25,893	60	1553,473	-15,441	1560,769	-27,644
42	1553,473	-16,870	1560,746	-26,228					

Tabulka 9: Průměrné hodnoty útlumu třetí a čtvrté mřížky



Graf 9: Závislost útlumu mřížek na teplotě

8 Závěr

V této diplomové práci jsem se věnovala problematice optických vláknových Braggovských mřížek. Zabývala jsem se chováním Braggovských mřížek při působení různých hodnot okolních teplot. K vlastnímu měření bylo využito třech optických jednomódových vláken. Dvě vlákna měly v sobě vyrobenou každé pouze jednu Braggovskou vláknovou mřížku. Třetí vlákno v sobě mělo vypálené čtyři mřížky s odlišnými rezonančními vlnovými délkami, $\lambda_1 = 1533,234$ nm, $\lambda_2 = 1544,872$ nm, $\lambda_3 = 1553,522$ nm a $\lambda_4 = 1558,472$ nm. Dále bylo využito dvou typů laserů. Jeden laser byl širokospektrální s Fabry-Perot rezonátorem, ten je studenty běžně využíván při výuce. U tohoto typu zařízení si lze zvolit zda bude vyzařovat světlo s vlnovou délkou 1310 nm nebo s vlnovou délkou 1550 nm. Pro osvětlení jednomódového vlákna se čtyřmi mřížkami bylo využito WDM sestavy od firmy Safibra, která má v sobě zabudovány čtyři DFB lasery s rezonančními vlnovými délkami $\lambda_1 = 1533$ nm, $\lambda_2 = 1545$ nm, $\lambda_3 = 1553$ nm a $\lambda_4 = 1558$ nm. Dále tento přístroj disponuje 1 x 4 couplerem, toho bylo využito k propojení všech čtyřech laserů na jeden výstup do optického vlákna. Pro zobrazení výsledného spektra jsem použila přístroj WA 7100/7600.

V první části praktické práce jsem se zabývala dvěma vlákny s rezonančními vlnovými délkami $\lambda_1 = 1310,336$ nm, $\lambda_2 = 1551,163$ nm. Každé vlákno bylo proměřeno zvlášť. K jejich postupnému teplotnímu zatížení bylo použito teplotního rozsahu 25°C - 60°C. Mřížky jsem zahřívala po dvou stupních celsia. Jako vstupní zdroj záření byl použit právě širokospektrální laser. V tomto směru se splnilo moje očekávání, tento typ laseru byl pro měření naprosto nevhodný. Pokud chceme pozorovat vliv teploty na mřížky, je namístě používat DFB laser. Nejprve jsem proměřila pouze spektrum laseru bez zapojeného vlákna s Braggovskou mřížkou. Jeho spektrum bylo velmi široké, obsahovalo velké množství maxim. To je způsobeno tím, že laser je mnohamódový. Po zapojení vlákna s mřížkou, spektrum na výstupu nedoznalo pouhým okem pozorovatelné změny oproti zapojení bez mřížky. Bylo to způsobené tím, že rezonanční vlnová délka mřížky se nacházela bohužel mezi dvěma maximy. Rozhodla jsem se tedy měřit celkový výkon signálu z vybrané oblasti spektra. Naměřené hodnoty a grafy jsou uvedeny v kapitole 6.2 a kapitole 6.3. Cílem tohoto měření bylo dokázat nevhodnost použití tohoto typu laseru a to se podařilo.

Ve druhé části této diplomové práce jsem se zaměřila na měření propustnosti Braggovských mřížek. K měření bylo použito již zmíněné jednomódové vlákno se čtyřmi vypálenými mřížkami. Proměřovala jsem je opět ve stejném teplotním rozsahu jako první dvě

mřížky. Na počátku měření jsem nevěděla zda budu každou mřížku měřit pouze jednou nebo zda bude nutné měření několikrát opakovat. Hned po prvním měření se ukázalo, že bude nezbytné měření opakovat, jelikož se hodnota jejich rezonanční vlnové délky nevracela na původní hodnotu. Mřížky jsem měřila každou zvlášť, dále jsem měla měřit různé kombinace a všechny čtyři mřížky dohromady. Z kombinací nakonec došlo pouze na měření první a druhé mřížky a třetí a čtvrté mřížky, jelikož mřížky byly u sebe vyrobeny velmi blízko a při použití jiných kombinací by mohlo dojít k poškození vlákna. Nejdříve jsem se rozhodla proměřit první mřížku, poté všechny čtyři mřížky, dále pak postupně každou mřížku zvlášť a nakonec kombinace mřížek. Jako zdroje záření byly v tomto případě použity již úzkospektrální DFB lasery. I u nich byly nejdříve proměřeny spektra.

Díky měření jsem objevila několik zajímavých vlastností mřížek. Hned u prvního opakování měření jsem zjistila, že mřížky se nevrací na počáteční hodnotu rezonanční vlnové délky. S každým dalším měřením hodnota vlnové délky narůstala až do určité velikosti, poté hodnota vlnové délky začala zase klesat. To bylo způsobeno tím, jak se mřížka vlivem tepla přibližovala rezonanční vlnové délce laseru. Některé mřížky v průběhu teplotního cyklu okolo rezonanční vlnové délky laseru oscilovaly. Další zajímavým zjištěním bylo, že některé mřížky po absolvování několika teplotních cyklů již svou vlnovou délku s dalším působením teploty nemění a zůstávají pouze na jedné hodnotě. To jsem zjistila při samostatném proměřování třetí mřížky. Hodnota její rezonanční vlnové délky zůstala stejná již po pátém teplotním cyklu. U dalších dvou mřížek se toto chování nakonec projevilo také, ale každá mřížka potřebovala jiný počet teplotních cyklů k tomu, aby se její vlnová délka přestala pohybovat s teplotou. Jediná mřížka, kde se toto chování neprokázalo byla čtvrtá. Bylo by dobré zabývat se touto vlastností dál. Mohlo by to být zajímavým tématem další diplomové práce. Navrhovala bych vzít několik Braggovských mřížek, každou v jednom optickém vlákne a nechat je projít několika teplotními cykly, zda se jejich vlnová délka ustálí. Bylo by vhodné zjistit kolik je potřeba teplotních cyklů a dále testovat, zda je tato změna trvalá nebo zda se po několika dnech mřížky opět rozkmitají na vlnové délce při novém teplotním cyklu.

Při pozorování útlumu se mřížky chovaly relativně standardně, jejich útlum s teplotou narůstal. Při měření první kombinace mřížek se ale objevila další zajímavá věc. Útlum mřížek se po několika teplotních cyklech pomalu přestával měnit. Bohužel se neustálil úplně, možná by stačilo pár dalších cyklů k tomu, aby se zastavil zcela. Je to další zajímavá vlastnost mřížek, možná by bylo vhodné před zavedením mřížek do provozu nechat mřížky teplotně zestárnout.

Pokud by se prokázalo, že mřížky se tímto stabilizují, daly by se použít i v oblastech kde dochází k rychlým změnám teplot. I tímto by bylo dobré zabývat se do budoucna.

Vzájemné ovlivňování mřížek jsem v průběhu měření nezpozorovala. Cílem diplomové práce bylo zjistit vliv teploty na chování mřížek. Chování, které jsem odhalila, je podrobněji popsáno v kapitole 7. Další vlastností mřížek je, že reagují na deformaci. Stačilo by vlákno ohýbat pouze v oblasti, kde je vypálená mřížka. Toto je dalším dobrým námětem k diplomové práci.

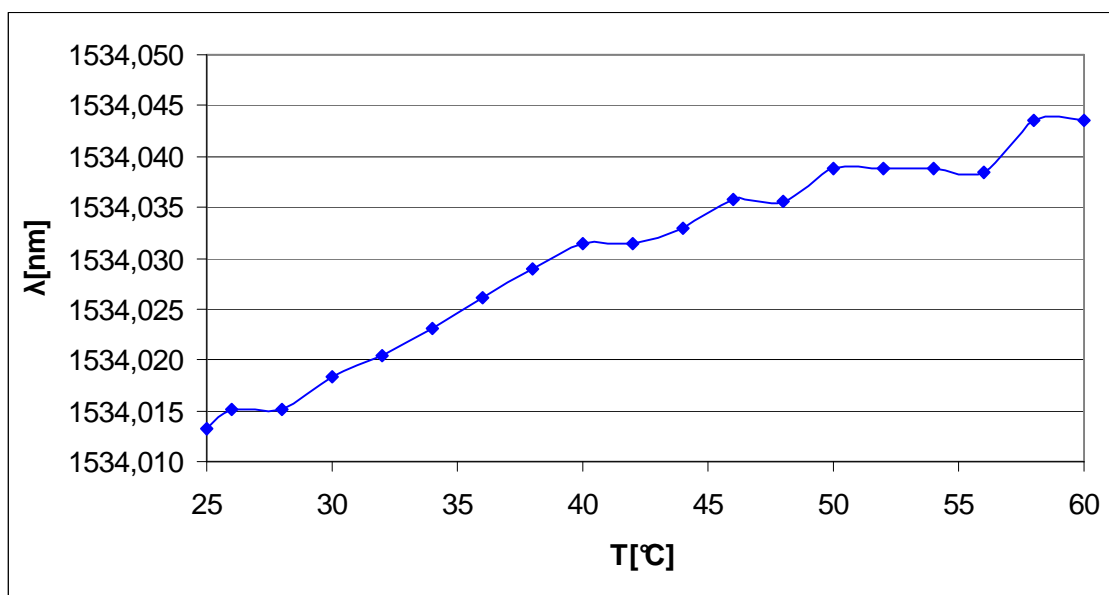
Literatura

- [1] Wikipedie – *Wikipedie, otevřená encyklopedie*
<http://cs.wikipedia.org>
- [2] Ing. Maršálek L. Optická vlákna, 2009
<http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [3] Doleček J. *Optoelektronika a optoelektronické prvky*, BEN - technická literatura, Praha 2005
- [4] Katedra telekomunikační techniky, Optické komunikační systémy
<http://www.comtel.cz/cz/>
- [5] Manuál k přístroji WA – 7100/7600
http://www.artisan-scientific.com/info/Burleigh_WA7600_WA7100_Operating_Manual.pdf
- [6] Andreas Othonos, Kyriacos Kalli *Fiber Bragg Gratings*, ARTECH HOUSE, INC. 1999

Přílohy I

T [°C]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]
25	1533,867	-21,214	1533,980	-20,965	1534,018	-21,974	1534,094	-20,449	1534,107	-21,057
26	1533,867	-21,214	1533,980	-21,155	1534,028	-21,586	1534,094	-20,449	1534,107	-21,057
28	1533,867	-20,982	1533,980	-21,727	1534,028	-21,586	1534,094	-20,652	1534,107	-21,260
30	1533,869	-21,214	1533,994	-21,346	1534,028	-21,198	1534,094	-20,854	1534,107	-21,057
32	1533,879	-21,214	1533,994	-21,155	1534,028	-21,198	1534,094	-21,057	1534,107	-20,854
34	1533,879	-20,982	1533,994	-20,965	1534,028	-21,392	1534,107	-21,057	1534,107	-20,652
36	1533,879	-20,982	1533,994	-21,155	1534,044	-21,586	1534,107	-21,057	1534,107	-20,652
38	1533,893	-21,445	1533,994	-21,346	1534,044	-21,586	1534,107	-20,854	1534,107	-20,652
40	1533,905	-21,445	1533,994	-21,346	1534,044	-21,780	1534,107	-20,854	1534,107	-20,854
42	1533,905	-21,677	1533,994	-21,536	1534,044	-21,974	1534,107	-20,854	1534,107	-21,057
44	1533,905	-21,909	1533,994	-21,727	1534,052	-21,974	1534,107	-20,854	1534,107	-21,057
46	1533,917	-22,141	1533,996	-21,727	1534,052	-21,974	1534,107	-20,652	1534,107	-21,057
48	1533,917	-22,372	1534,006	-21,727	1534,052	-22,168	1534,107	-20,652	1534,096	-20,854
50	1533,929	-23,299	1534,006	-21,727	1534,056	-22,362	1534,107	-20,652	1534,096	-21,057
52	1533,929	-23,299	1534,006	-21,917	1534,056	-22,557	1534,107	-20,652	1534,096	-20,854
54	1533,929	-23,531	1534,006	-21,917	1534,056	-22,751	1534,107	-20,652	1534,096	-20,854
56	1533,929	-24,226	1534,006	-22,108	1534,056	-22,751	1534,107	-20,854	1534,094	-20,652
58	1533,943	-24,583	1534,006	-22,488	1534,068	-22,945	1534,107	-20,854	1534,094	-20,854
60	1533,943	-25,154	1534,006	-23,250	1534,068	-22,945	1534,107	-21,057	1534,094	-21,057

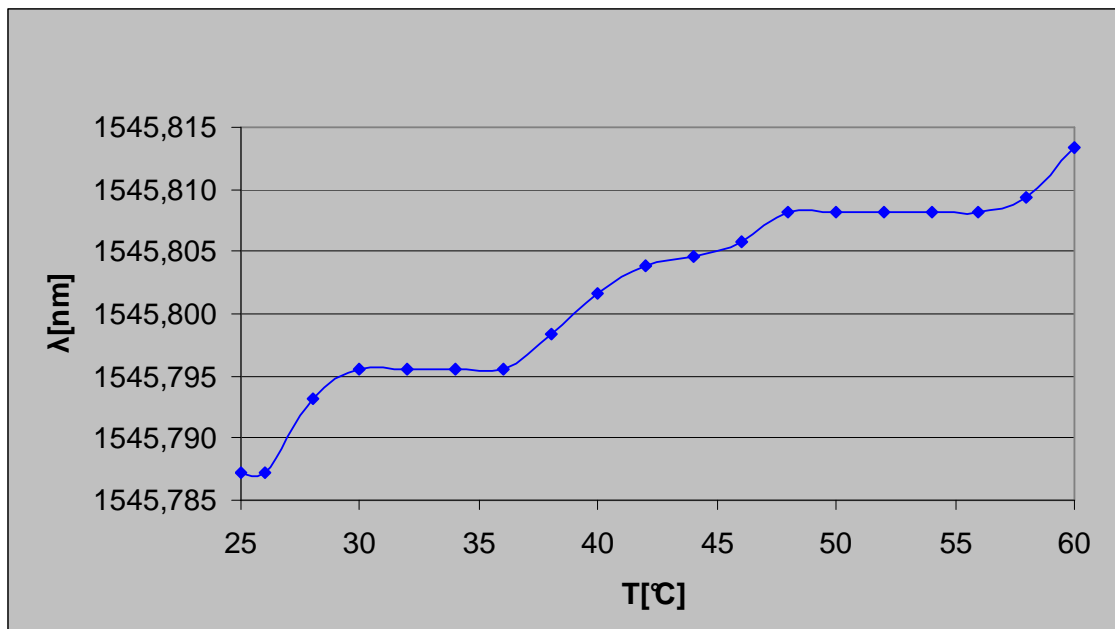
Tabulka 10: Naměřené hodnoty první mřížky



Graf 10: Závislost vlnové délky první mřížky na teplotě

T [°C]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]
25	1545,691	-20,715	1545,755	-21,635	1545,800	-22,835	1545,832	-21,442	1545,858	-21,041
26	1545,691	-20,914	1545,755	-21,635	1545,800	-22,835	1545,832	-21,642	1545,858	-21,041
28	1545,703	-20,914	1545,767	-21,875	1545,806	-22,355	1545,832	-21,842	1545,858	-21,041
30	1545,703	-21,155	1545,767	-21,635	1545,806	-22,115	1545,844	-21,842	1545,858	-21,041
32	1545,703	-21,155	1545,767	-21,395	1545,806	-21,875	1545,844	-21,842	1545,858	-21,241
34	1545,703	-21,155	1545,767	-21,395	1545,806	-22,115	1545,844	-21,642	1545,858	-21,312
36	1545,703	-21,395	1545,767	-21,395	1545,806	-22,115	1545,844	-21,442	1545,858	-21,312
38	1545,717	-21,635	1545,767	-21,395	1545,806	-22,355	1545,844	-21,442	1545,858	-21,312
40	1545,717	-21,395	1545,767	-21,635	1545,818	-22,595	1545,844	-21,442	1545,862	-21,518
42	1545,717	-21,395	1545,770	-21,875	1545,818	-22,355	1545,844	-21,442	1545,87	-21,312
44	1545,717	-21,395	1545,774	-21,875	1545,818	-22,355	1545,844	-21,442	1545,87	-21,106
46	1545,717	-21,635	1545,78	-21,875	1545,818	-22,115	1545,844	-21,442	1545,87	-20,901
48	1545,729	-21,875	1545,78	-21,875	1545,818	-21,875	1545,844	-21,442	1545,87	-20,901
50	1545,729	-21,395	1545,78	-21,635	1545,818	-21,875	1545,844	-21,442	1545,87	-20,695
52	1545,729	-21,395	1545,78	-21,635	1545,818	-22,115	1545,844	-21,442	1545,87	-20,901
54	1545,729	-21,395	1545,78	-21,395	1545,818	-22,355	1545,844	-21,642	1545,87	-20,901
56	1545,729	-21,635	1545,78	-21,395	1545,818	-22,595	1545,844	-21,642	1545,87	-20,901
58	1545,729	-21,875	1545,78	-21,395	1545,824	-22,843	1545,844	-21,842	1545,87	-21,106
60	1545,741	-22,115	1545,78	-21,635	1545,832	-22,843	1545,844	-22,042	1545,87	-21,106

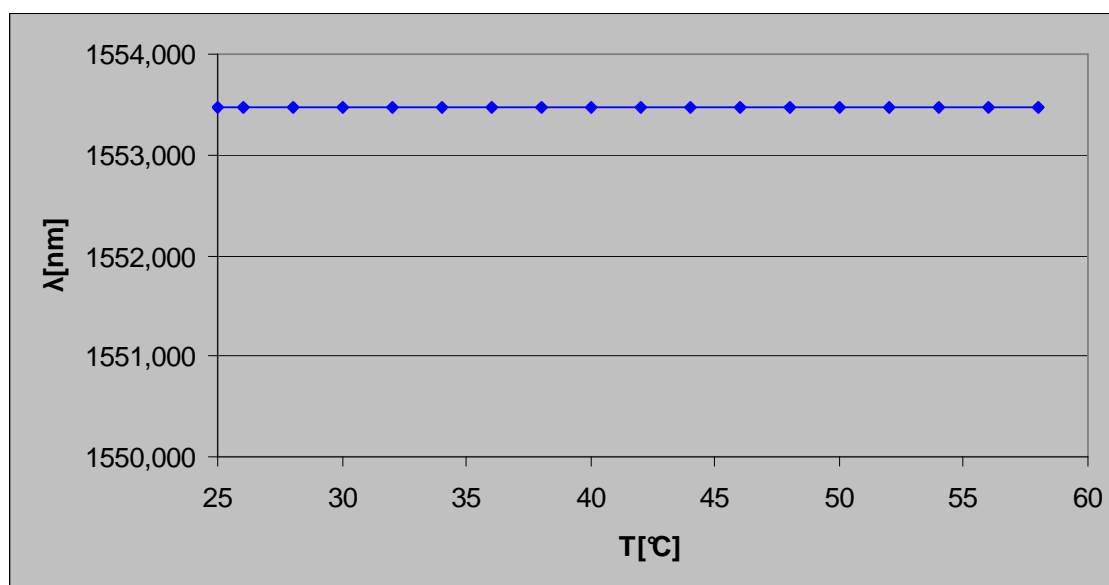
Tabulka 11: Naměřené hodnoty druhé mřížky



Graf 11: Závislost vlnové délky druhé mřížky na teplotě

T [°C]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]
25	1553,472	-20,704	1553,472	-20,204	1553,472	-20,904	1553,472	-20,704	1553,472	-20,704
26	1553,472	-20,204	1553,472	-19,700	1553,472	-20,704	1553,472	-20,302	1553,472	-20,102
28	1553,472	-19,904	1553,472	-19,499	1553,472	-20,302	1553,472	-19,700	1553,472	-19,901
30	1553,472	-19,298	1553,472	-19,298	1553,472	-20,102	1553,472	-19,298	1553,472	-19,298
32	1553,472	-18,495	1553,472	-18,897	1553,472	-19,298	1553,472	-18,897	1553,472	-18,696
34	1553,472	-17,893	1553,472	-18,094	1553,472	-18,696	1553,472	-18,495	1553,472	-18,094
36	1553,472	-17,09	1553,472	-17,491	1553,472	-18,094	1553,472	-17,692	1553,472	-17,692
38	1553,472	-16,688	1553,472	-16,889	1553,472	-17,893	1553,472	-17,290	1553,472	-17,29
40	1553,472	-16,286	1553,472	-16,487	1553,472	-17,491	1553,472	-16,688	1553,472	-16,688
42	1553,472	-16,086	1553,472	-16,086	1553,472	-16,889	1553,472	-16,286	1553,472	-16,086
44	1553,472	-15,684	1553,472	-15,684	1553,472	-16,487	1553,472	-15,885	1553,472	-15,684
46	1553,472	-15,684	1553,472	-15,483	1553,472	-16,086	1553,472	-15,483	1553,472	-15,483
48	1553,472	-15,483	1553,472	-15,282	1553,472	-15,885	1553,472	-15,282	1553,472	-15,282
50	1553,472	-15,282	1553,472	-15,082	1553,472	-15,885	1553,472	-15,082	1553,472	-15,082
52	1553,472	-15,282	1553,472	-15,082	1553,472	-15,684	1553,472	-14,881	1553,472	-14,881
54	1553,472	-15,282	1553,472	-15,082	1553,472	-15,483	1553,472	-14,680	1553,472	-14,881
56	1553,472	-15,282	1553,472	-15,082	1553,472	-15,483	1553,472	-14,680	1553,472	-14,881
58	1553,472	-15,282	1553,472	-15,082	1553,472	-15,483	1553,472	-14,680	1553,472	-14,881
60	1553,472	-15,282	1553,472	-15,082	1553,472	-15,483	1553,472	-14,680	1553,472	-14,881

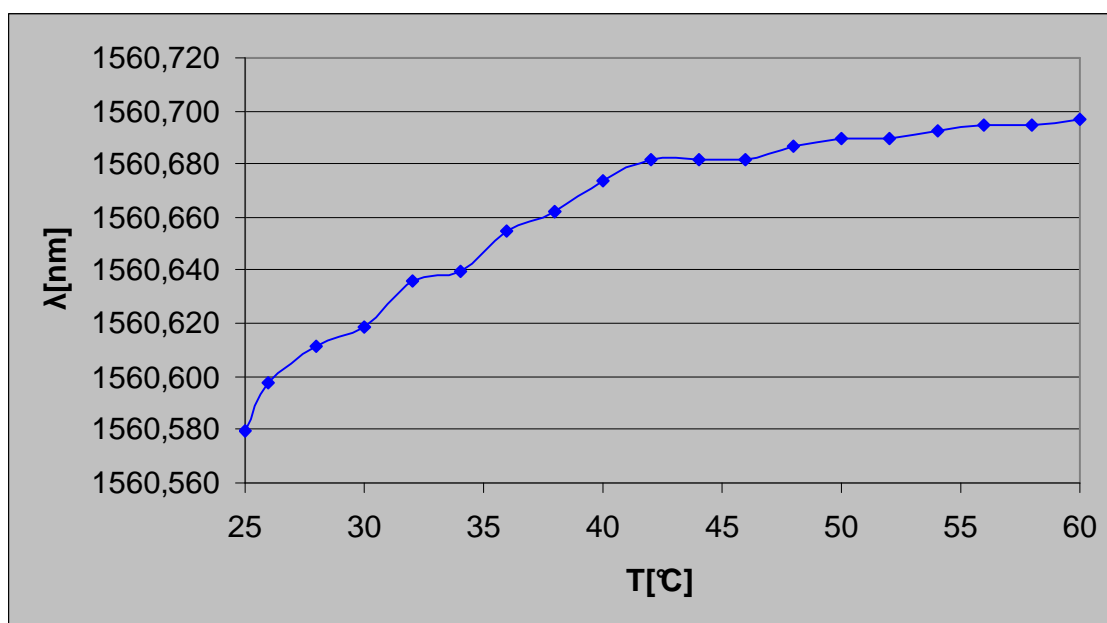
Tabulka 12: Naměřené hodnoty třetí mřížky



Graf 12: Závislost vlnové délky třetí mřížky na teplotě

T [°C]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]
25	1560,498	-28,559	1560,304	-29,305	1560,628	-22,034	1560,719	-21,342	1560,747	-22,290
26	1560,524	-32,505	1560,354	-36,759	1560,628	-22,494	1560,725	-21,342	1560,759	-23,405
28	1560,550	-35,067	1560,374	-38,282	1560,642	-22,579	1560,733	-21,607	1560,759	-24,476
30	1560,564	-36,092	1560,380	-39,024	1560,642	-23,150	1560,733	-21,954	1560,773	-24,527
32	1560,576	-37,117	1560,429	-41,433	1560,656	-23,650	1560,746	-22,126	1560,773	-24,954
34	1560,576	-37,630	1560,447	-42,092	1560,656	-24,435	1560,746	-22,192	1560,773	-25,548
36	1560,590	-38,142	1560,485	-43,640	1560,667	-25,292	1560,746	-22,259	1560,785	-25,932
38	1560,603	-38,655	1560,511	-44,460	1560,667	-25,792	1560,746	-22,655	1560,785	-26,160
40	1560,617	-39,062	1560,552	-44,936	1560,667	-27,148	1560,746	-23,052	1560,785	-26,211
42	1560,617	-39,270	1560,564	-45,052	1560,681	-27,434	1560,760	-23,118	1560,785	-26,211
44	1560,617	-39,478	1560,564	-45,148	1560,681	-28,077	1560,760	-23,184	1560,785	-26,160
46	1560,617	-39,582	1560,577	-46,060	1560,681	-29,576	1560,760	-23,250	1560,773	-25,497
48	1560,617	-39,790	1560,589	-46,329	1560,695	-29,790	1560,760	-23,514	1560,773	-24,935
50	1560,617	-39,890	1560,603	-46,521	1560,695	-29,933	1560,760	-23,580	1560,773	-24,884
52	1560,617	-39,894	1560,603	-46,559	1560,695	-30,290	1560,760	-24,175	1560,773	-24,476
54	1560,617	-39,790	1560,615	-46,857	1560,695	-30,576	1560,762	-24,506	1560,773	-24,425
56	1560,617	-39,686	1560,615	-47,299	1560,695	-30,933	1560,772	-24,572	1560,773	-24,425
58	1560,617	-39,686	1560,629	-47,520	1560,695	-31,432	1560,772	-24,638	1560,761	-24,323
60	1560,617	-39,686	1560,629	-47,606	1560,706	-32,004	1560,772	-24,704	1560,759	-24,272

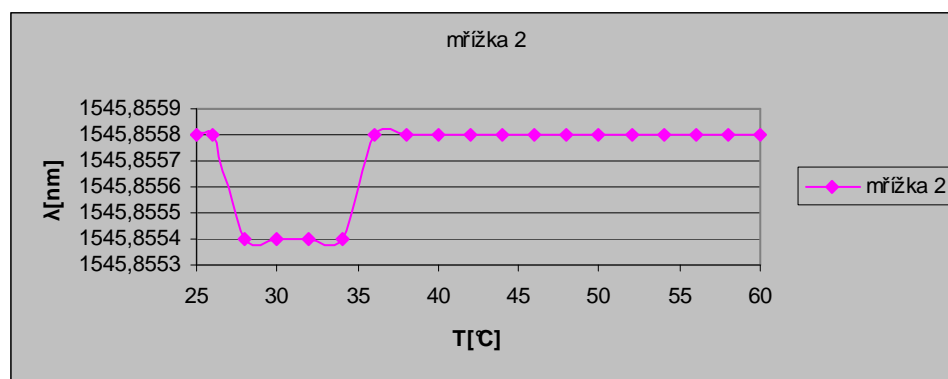
Tabulka 13: Naměřené hodnoty čtvrté mřížky



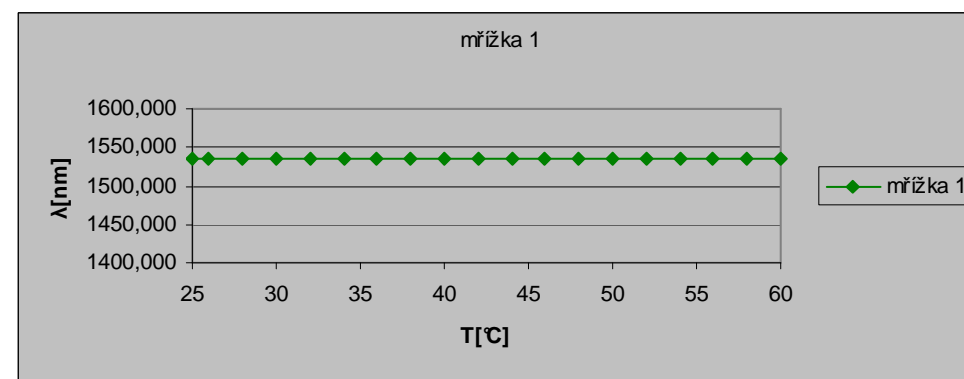
Graf 13: Závislost vlnové délky čtvrté mřížky na teplotě

T [°C]	λ_1 [nm]	P[dBm]	λ_2 [nm]	P[dBm]	λ_1 [nm]	P[dBm]	λ_2 [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]
25	1534,144	-21,106	1545,847	-21,106	1534,144	-20,704	1545,858	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-20,704	1534,144	-20,905	1545,858	-20,704	1534,144	-20,905	1545,858	-20,704
26	1534,144	-21,106	1545,847	-20,905	1534,144	-20,704	1545,858	-20,704	1534,144	-20,905	1545,858	-20,704	1534,144	-20,905	1545,858	-20,704	1534,144	-20,905	1545,858	-20,704
28	1534,144	-21,106	1545,845	-20,905	1534,144	-20,704	1545,858	-20,704	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905
30	1534,144	-21,106	1545,845	-20,905	1534,144	-20,704	1545,858	-20,704	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905
32	1534,144	-21,106	1545,845	-20,905	1534,144	-20,704	1545,858	-20,704	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905
34	1534,144	-21,106	1545,845	-20,905	1534,144	-20,704	1545,858	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905
36	1534,144	-21,106	1545,847	-20,905	1534,144	-20,704	1545,858	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905
38	1534,144	-21,306	1545,847	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-21,106	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905
40	1534,144	-21,106	1545,847	-20,704	1534,144	-20,905	1545,858	-21,206	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905
42	1534,144	-21,106	1545,847	-20,704	1534,144	-20,905	1545,858	-21,306	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-21,106	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905
44	1534,144	-21,106	1545,847	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-21,306	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-21,106	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905
46	1534,144	-21,106	1545,847	-21,106	1534,144	-20,905	1545,858	-21,306	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-21,106	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905
48	1534,144	-21,106	1545,847	-20,905	1534,144	-20,905	1545,858	-21,507	1534,144	-20,905	1545,858	-21,106	1534,144	-21,106	1545,858	-21,106	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905
50	1534,144	-21,106	1545,847	-20,704	1534,144	-21,106	1545,858	-21,507	1534,144	-20,905	1545,858	-21,106	1534,144	-21,106	1545,858	-21,106	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905
52	1534,144	-21,106	1545,847	-20,905	1534,144	-21,106	1545,858	-21,507	1534,144	-20,905	1545,858	-21,106	1534,144	-21,106	1545,858	-21,106	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905
54	1534,144	-21,106	1545,847	-20,905	1534,144	-21,106	1545,858	-21,708	1534,144	-20,905	1545,858	-21,106	1534,144	-21,106	1545,858	-21,106	1534,144	-20,905	1545,858	-20,905
56	1534,144	-21,106	1545,847	-20,905	1534,144	-21,106	1545,858	-21,708	1534,144	-21,106	1545,858	-21,106	1534,144	-21,106	1545,858	-21,106	1534,144	-20,905	1545,858	-21,106
58	1534,144	-21,306	1545,847	-20,905	1534,144	-21,106	1545,858	-21,708	1534,144	-21,106	1545,858	-21,106	1534,144	-21,106	1545,858	-21,106	1534,144	-20,905	1545,858	-21,106
60	1534,144	-21,306	1545,847	-21,106	1534,144	-21,106	1545,858	-21,909	1534,144	-21,106	1545,858	-21,106	1534,144	-21,106	1545,858	-21,106	1534,144	-21,106	1545,858	-21,106

Tabulka 14: Naměřené hodnoty první a druhé mřížky



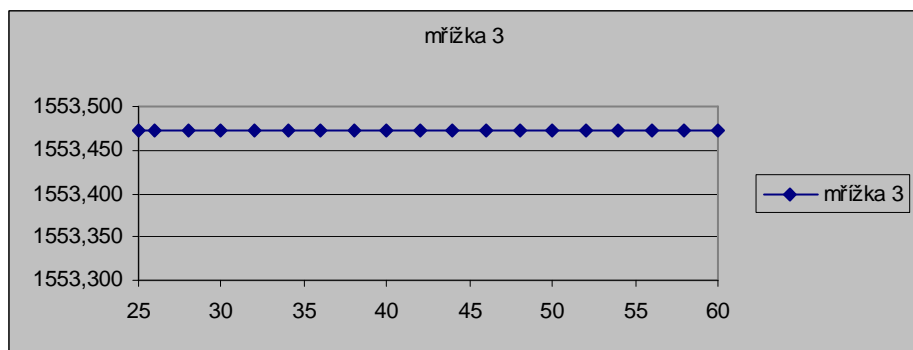
Graf 14: Závislost vlnové délky druhé mřížky na teplotě



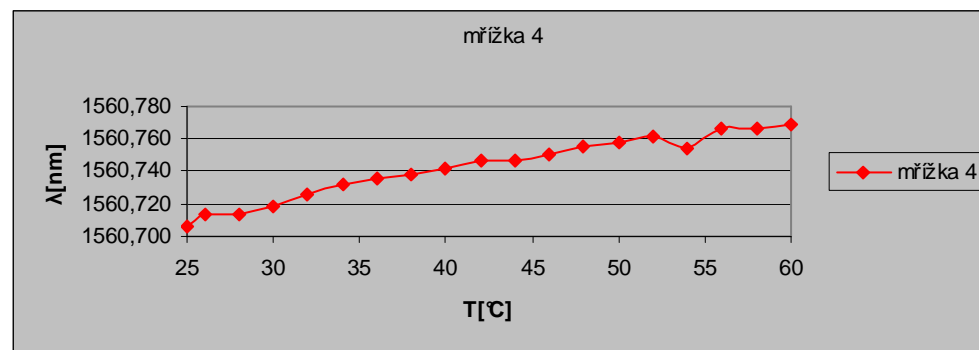
Graf 15: Závislost vlnové délky první mřížky na teplotě

T [°C]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]	λ [nm]	P[dBm]
25	1553,473	-21,856	1560,473	-24,348	1553,473	-21,253	1560,707	-20,497	1553,473	-20,204	1560,747	-21,342	1553,473	-20,704	1560,791	-22,290	1553,473	-21,856	1560,812	-20,724
26	1553,473	-21,568	1560,499	-25,935	1553,473	-21,132	1560,707	-20,497	1553,473	-19,700	1560,759	-21,342	1553,473	-20,302	1560,791	-23,405	1553,473	-21,630	1560,812	-20,724
28	1553,473	-21,177	1560,499	-27,067	1553,473	-20,950	1560,707	-20,497	1553,473	-19,499	1560,759	-21,607	1553,473	-19,700	1560,791	-24,476	1553,473	-21,177	1560,812	-20,724
30	1553,473	-20,724	1560,511	-29,786	1553,473	-20,044	1560,707	-26,841	1553,473	-19,298	1560,773	-21,954	1553,473	-19,298	1560,791	-24,527	1553,473	-20,724	1560,812	-20,724
32	1553,473	-20,270	1560,537	-32,958	1553,473	-19,572	1560,719	-24,629	1553,473	-18,897	1560,773	-22,126	1553,473	-18,897	1560,791	-24,954	1553,473	-20,044	1560,812	-20,724
34	1553,473	-19,817	1560,550	-34,544	1553,473	-18,685	1560,733	-22,083	1553,473	-18,094	1560,773	-22,192	1553,473	-18,495	1560,791	-24,954	1553,473	-19,678	1560,812	-20,950
36	1553,473	-18,911	1560,564	-36,130	1553,473	-18,582	1560,733	-21,986	1553,473	-17,491	1560,773	-22,259	1553,473	-17,692	1560,799	-24,506	1553,473	-19,138	1560,812	-20,950
38	1553,473	-18,458	1560,576	-36,809	1553,473	-18,458	1560,733	-21,856	1553,473	-16,889	1560,773	-22,655	1553,473	-17,290	1560,799	-24,175	1553,473	-18,685	1560,812	-21,177
40	1553,473	-17,778	1560,590	-37,715	1553,473	-17,778	1560,735	-22,989	1553,473	-16,487	1560,773	-23,184	1553,473	-16,688	1560,799	-24,175	1553,473	-18,005	1560,812	-21,403
42	1553,473	-17,099	1560,602	-38,622	1553,473	-17,325	1560,745	-22,763	1553,473	-16,086	1560,773	-24,175	1553,473	-16,286	1560,799	-24,175	1553,473	-17,552	1560,812	-21,403
44	1553,473	-16,645	1560,602	-39,075	1553,473	-16,872	1560,745	-23,669	1553,473	-15,684	1560,773	-23,184	1553,473	-15,885	1560,799	-23,184	1553,473	-17,099	1560,812	-21,403
46	1553,473	-16,419	1560,602	-39,754	1553,471	-16,645	1560,759	-24,122	1553,473	-15,483	1560,773	-23,250	1553,473	-15,483	1560,808	-23,184	1553,473	-16,872	1560,812	-21,630
48	1553,473	-16,192	1560,616	-39,981	1553,471	-16,419	1560,759	-24,122	1553,473	-15,282	1560,785	-23,514	1553,473	-15,282	1560,808	-23,184	1553,473	-16,645	1560,812	-21,403
50	1553,473	-15,966	1560,628	-40,661	1553,473	-15,966	1560,759	-24,802	1553,473	-15,082	1560,785	-23,580	1553,473	-15,082	1560,808	-22,655	1553,473	-16,419	1560,812	-21,403
52	1553,473	-15,739	1560,642	-41,389	1553,473	-15,966	1560,759	-25,255	1553,473	-15,082	1560,785	-24,175	1553,473	-14,881	1560,808	-22,259	1553,473	-16,419	1560,812	-21,630
54	1553,473	-15,739	1560,644	-41,793	1553,473	-15,966	1560,722	-25,708	1553,473	-15,082	1560,785	-24,506	1553,473	-14,680	1560,808	-22,259	1553,473	-16,192	1560,812	-21,630
56	1553,473	-15,513	1560,654	-41,576	1553,473	-15,739	1560,772	-25,708	1553,473	-15,082	1560,785	-24,572	1553,473	-14,680	1560,808	-22,259	1553,473	-16,192	1560,812	-21,856
58	1553,473	-15,513	1560,654	-42,020	1553,473	-15,739	1560,772	-26,387	1553,473	-15,082	1560,785	-24,638	1553,473	-14,680	1560,808	-21,893	1553,473	-16,192	1560,812	-21,856
60	1553,473	-15,513	1560,668	-42,247	1553,473	-15,739	1560,772	-27,520	1553,473	-15,082	1560,785	-24,704	1553,473	-14,680	1560,808	-21,893	1553,473	-16,192	1560,812	-21,856

Tabulka 15: Naměřené hodnoty třetí a čtvrté mřížky



Graf 16: Závislost vlnové délky třetí mřížky na teplotě

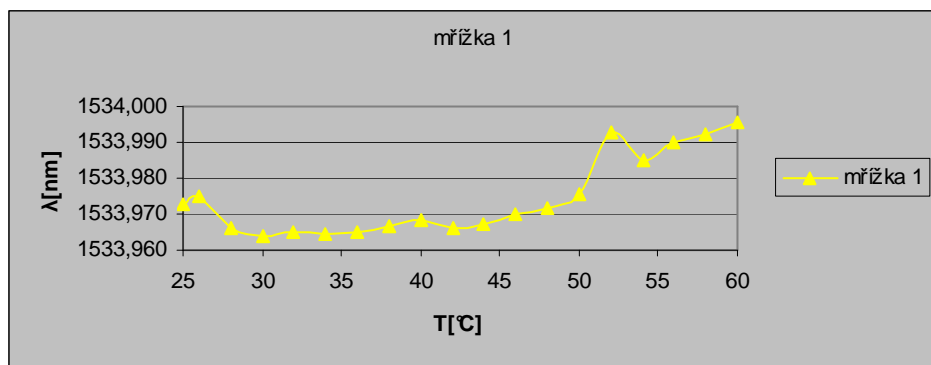


Graf 17: Závislost vlnové délky čtvrté mřížky na teplotě

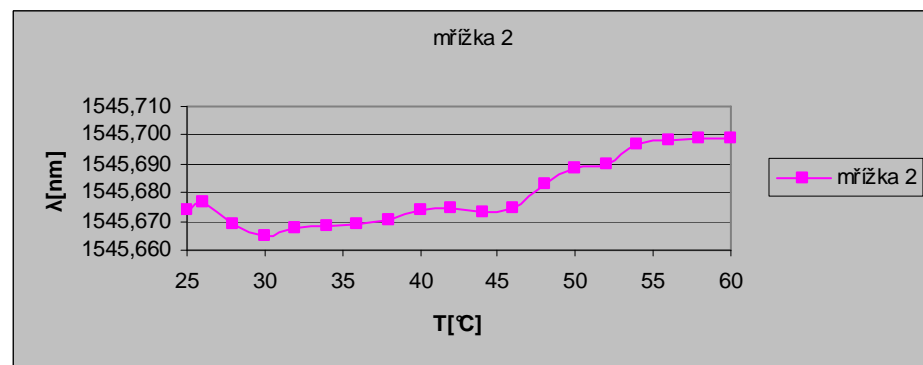
T [°C]	λ_1 [nm]	P1[dBm]	λ_2 [nm]	P2[dBm]	λ_3 [nm]	P3[dBm]	λ_4 [nm]	P4[dBm]
25	1534,133	-20,876	1545,835	-20,510	1553,554	-21,730	1560,899	-21,364
26	1534,133	-20,876	1545,835	-20,510	1553,554	-21,486	1560,899	-21,242
28	1534,077	-20,876	1545,786	-20,623	1553,555	-20,998	1560,824	-21,242
30	1534,048	-20,998	1545,751	-20,632	1553,486	-20,510	1560,795	-21,242
32	1534,058	-21,242	1545,751	-20,632	1553,486	-20,021	1560,805	-21,364
34	1534,050	-21,242	1545,756	-20,754	1553,477	-19,411	1560,790	-21,486
36	1534,049	-20,998	1545,756	-21,242	1553,473	-18,801	1560,787	-21,486
38	1534,045	-21,501	1545,755	-20,698	1553,472	-18,087	1560,785	-22,305
40	1534,043	-21,100	1545,745	-21,300	1553,475	-17,686	1560,785	-22,104
42	1534,031	-21,100	1545,743	-20,899	1553,475	-17,284	1560,785	-21,702
44	1534,030	-21,100	1545,743	-21,100	1553,473	-17,083	1560,786	-22,104
46	1534,044	-21,501	1545,741	-21,100	1553,473	-16,682	1560,785	-21,903
48	1534,042	-21,702	1545,756	-21,100	1553,472	-16,481	1560,785	-22,305
50	1534,056	-21,501	1545,767	-21,100	1553,472	-15,878	1560,799	-22,505
52	1534,056	-21,501	1545,767	-21,100	1553,472	-15,878	1560,799	-22,505
54	1534,068	-21,903	1545,781	-20,698	1553,472	-15,677	1560,811	-23,510
56	1534,081	-22,907	1545,781	-21,903	1553,472	-16,481	1560,815	-25,919
58	1534,079	-23,510	1545,779	-22,305	1553,472	-17,083	1560,825	-26,522
60	1534,081	-23,911	1545,779	-22,104	1553,472	-17,083	1560,825	-26,522

T [°C]	λ_1 [nm]	P1[dBm]	λ_2 [nm]	P2[dBm]	λ_3 [nm]	P3[dBm]	λ_4 [nm]	P4[dBm]
25	1533,752	-19,419	1545,447	-20,610	1553,474	-21,562	1560,460	-25,132
26	1533,768	-19,895	1545,463	-21,324	1553,474	-21,562	1560,485	-28,464
28	1533,779	-20,357	1545,475	-21,324	1553,472	-20,984	1560,491	-29,783
30	1533,792	-20,610	1545,487	-21,324	1553,472	-20,610	1560,497	-31,083
32	1533,803	-20,372	1545,499	-21,324	1553,470	-19,657	1560,525	-34,415
34	1533,813	-20,372	1545,512	-21,086	1553,472	-19,181	1560,537	-35,605
36	1533,818	-20,894	1545,519	-21,679	1553,472	-18,852	1560,547	-36,701
38	1533,829	-21,324	1545,525	-22,038	1553,472	-18,229	1560,551	-37,509
40	1533,853	-21,324	1545,551	-21,800	1553,474	-17,277	1560,577	-38,938
42	1533,859	-21,851	1545,558	-22,187	1553,474	-16,951	1560,582	-39,580
44	1533,866	-22,038	1545,563	-22,276	1553,474	-16,563	1560,593	-40,366
46	1533,878	-22,752	1545,577	-22,752	1553,473	-16,087	1560,615	-40,842
48	1533,885	-23,102	1545,581	-22,752	1553,473	-15,991	1560,620	-41,278
50	1533,891	-23,466	1545,589	-22,752	1553,473	-15,849	1560,628	-41,794
52	1533,965	-24,102	1545,593	-22,970	1553,473	-15,756	1560,628	-41,980
54	1533,906	-24,656	1545,602	-23,466	1553,473	-15,611	1560,628	-42,270
56	1533,906	-25,703	1545,608	-24,100	1553,473	-15,521	1560,635	-42,270
58	1533,906	-26,084	1545,614	-24,894	1553,473	-15,373	1560,643	-42,270
60	1533,918	-25,846	1545,617	-24,894	1553,473	-15,373	1560,655	-42,508

Tabulka 16: Naměřené hodnoty prvních dvou teplotních cyklů všech mřížek



Graf 18: Závislost vlnové délky první mřížky na teplotě

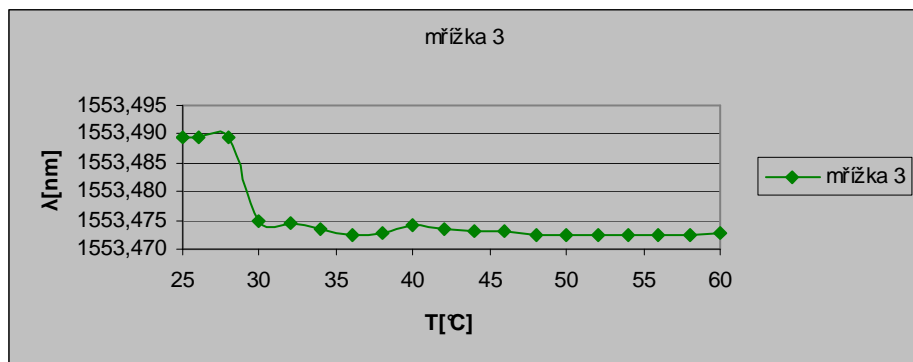


Graf 19: Závislost vlnové délky druhé mřížky na teplotě

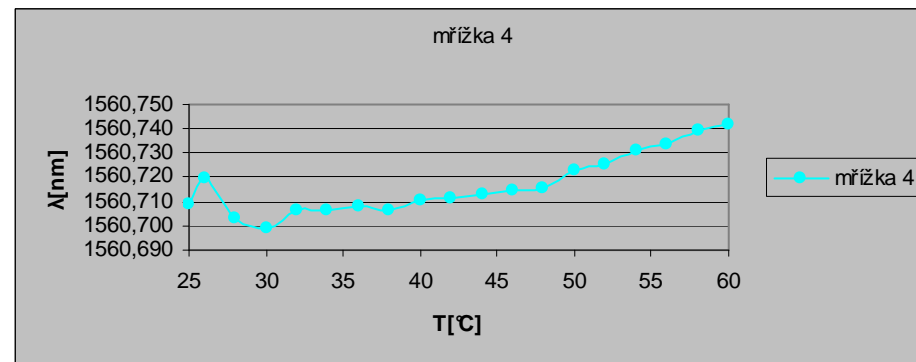
T [°C]	λ_1 [nm]	P1[dBm]	λ_2 [nm]	P2[dBm]	λ_3 [nm]	P3[dBm]	λ_4 [nm]	P4[dBm]
25	1534,083	-22,706	1545,780	-22,505	1553,472	-22,706	1560,799	-24,915
26	1534,078	-20,899	1545,780	-21,300	1553,473	-21,100	1560,825	-25,919
28	1534,078	-20,698	1545,780	-20,899	1553,473	-20,698	1560,812	-25,719
30	1534,082	-20,899	1545,781	-20,899	1553,472	-20,096	1560,812	-25,116
32	1534,066	-21,100	1545,781	-21,100	1553,472	-19,292	1560,811	-24,714
34	1534,068	-20,497	1545,767	-21,100	1553,473	-18,891	1560,811	-24,313
36	1534,068	-20,698	1545,767	-20,899	1553,473	-18,288	1560,812	-24,313
38	1534,069	-21,100	1545,767	-20,899	1553,474	-17,886	1560,803	-24,313
40	1534,059	-21,100	1545,768	-21,100	1553,474	-17,284	1560,800	-24,112
42	1534,056	-20,698	1545,768	-21,300	1553,472	-16,882	1560,798	-23,510
44	1534,056	-20,497	1545,754	-21,300	1553,472	-16,728	1560,798	-23,108
46	1534,044	-21,501	1545,741	-21,100	1553,473	-16,576	1560,787	-21,940
48	1534,042	-21,501	1545,758	-21,100	1553,472	-16,481	1560,785	-22,305
50	1534,032	-21,501	1545,767	-20,698	1553,472	-15,879	1560,799	-22,483
52	1534,045	-21,702	1545,769	-21,300	1553,472	-15,879	1560,799	-23,516
54	1534,054	-21,907	1545,781	-20,698	1553,472	-15,677	1560,814	-23,516
56	1534,065	-22,967	1545,783	-21,903	1553,472	-16,462	1560,815	-25,913
58	1534,079	-23,815	1545,779	-22,305	1553,472	-16,982	1560,827	-26,524
60	1534,081	-23,918	1545,779	-22,104	1553,472	-17,037	1560,827	-26,524

Tabulka 17: Naměřené hodnoty třetího a čtvrtého teplotního cyklu všech mřížek

T [°C]	λ_1 [nm]	P1[dBm]	λ_2 [nm]	P2[dBm]	λ_3 [nm]	P3[dBm]	λ_4 [nm]	P4[dBm]
25	1533,956	-21,324	1545,653	-21,562	1553,473	-21,800	1560,694	-21,086
26	1533,956	-21,324	1545,652	-21,678	1553,473	-21,598	1560,695	-21,598
28	1533,956	-21,324	1545,652	-21,800	1553,473	-21,324	1560,695	-21,324
30	1533,956	-21,324	1545,654	-21,800	1553,472	-20,372	1560,697	-21,800
32	1533,956	-21,324	1545,655	-21,800	1553,472	-20,133	1560,698	-21,800
34	1533,947	-21,800	1545,654	-21,800	1553,473	-19,489	1560,699	-21,800
36	1533,947	-21,800	1545,653	-21,800	1553,473	-18,863	1560,699	-21,800
38	1533,947	-21,800	1545,653	-21,800	1553,474	-18,229	1560,699	-21,800
40	1533,945	-21,324	1545,652	-21,324	1553,474	-17,892	1560,697	-21,721
42	1533,942	-21,324	1545,652	-21,324	1553,474	-17,277	1560,696	-21,562
44	1533,941	-21,324	1545,652	-21,324	1553,474	-16,563	1560,694	-21,086
46	1533,941	-21,562	1545,653	-21,324	1553,474	-16,325	1560,694	-20,848
48	1533,943	-22,038	1545,653	-21,562	1553,473	-16,087	1560,694	-20,848
50	1533,943	-22,387	1545,653	-21,893	1553,473	-16,087	1560,693	-21,086
52	1533,943	-22,514	1545,653	-22,038	1553,473	-16,087	1560,693	-21,086
54	1533,942	-23,228	1545,653	-22,514	1553,472	-15,849	1560,693	-21,086
56	1533,942	-23,792	1545,653	-22,967	1553,472	-15,849	1560,694	-21,086
58	1533,942	-24,418	1545,653	-23,228	1553,472	-15,849	1560,694	-21,086
60	1533,943	-24,894	1545,651	-23,704	1553,474	-15,611	1560,694	-20,848



Graf 20: Závislost vlnové délky třetí mřížky na teplotě



Graf 21: Závislost vlnové délky čtvrté mřížky na teplotě

T [°C]	λ1 [nm]	P1[dBm]	λ2 [nm]	P2[dBm]	λ3 [nm]	P3[dBm]	λ4 [nm]	P4[dBm]
25	1533,941	-21,324	1545,653	-20,610	1553,474	-21,800	1560,694	-21,086
26	1533,941	-21,324	1545,653	-20,610	1553,474	-21,672	1560,695	-21,086
28	1533,941	-21,324	1545,653	-20,610	1553,474	-21,324	1560,695	-21,086
30	1533,942	-21,215	1545,653	-20,610	1553,473	-20,981	1560,695	-21,086
32	1533,942	-21,172	1545,653	-20,610	1553,473	-20,089	1560,695	-21,086
34	1533,943	-21,086	1545,653	-20,610	1553,472	-19,181	1560,695	-21,086
36	1533,943	-20,848	1545,650	-21,086	1553,472	-18,572	1560,695	-20,874
38	1533,942	-20,848	1545,652	-20,372	1553,472	-17,991	1560,695	-20,610
40	1533,942	-20,848	1545,653	-20,372	1553,473	-17,039	1560,695	-20,610
42	1533,943	-21,086	1545,653	-20,537	1553,473	-16,965	1560,694	-21,086
44	1533,943	-21,324	1545,653	-20,848	1553,473	-16,563	1560,694	-21,086
46	1533,944	-21,324	1545,660	-20,936	1553,472	-16,478	1560,694	-21,324
48	1533,945	-21,276	1545,666	-21,086	1553,472	-16,325	1560,694	-21,324
50	1533,955	-22,276	1545,666	-20,610	1553,472	-16,087	1560,696	-21,800
52	1533,955	-22,276	1545,666	-20,848	1553,473	-15,849	1560,706	-21,562
54	1533,955	-22,854	1545,666	-21,324	1553,473	-15,849	1560,708	-21,562
56	1533,955	-23,228	1545,666	-21,324	1553,473	-15,849	1560,708	-21,562
58	1533,955	-23,932	1545,668	-22,043	1553,473	-16,325	1560,708	-21,800
60	1533,955	-24,894	1545,668	-22,752	1553,473	-16,325	1560,708	-22,038

Tabulka 18: Naměřené hodnoty pátého teplotního cyklu všech mřížek